

FEN VE MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALARI-III



EDİTÖRLER

PROF. DR. MEHMET ŞİMŞİR

PROF. DR. SALİM CEM İNAN

PROF. DR. SAYİTER YILDIZ

DOÇ. DR. EBRU YABAŞ

FEN VE MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALARI-III

EDİTÖR

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Prof. Dr. Salih Cem İNAN

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ

Doç. Dr. Ebru YABAŞ

YAZARLAR

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ

Öğr. Gör. Esen Bilge BİÇER

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI

Arş. Gör. İlhan DANACI

Fatih ÖZAYDIN



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-519-2

Cover Design: Atabek Movlyanov

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size = 16x24 cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

Editörlerden1

BÖLÜM 1

KAM MİLLERİNE UYGULANA KRİYOJENİK İŞLEMİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Fatih ÖZAYDIN3

BÖLÜM 2

UÇAKLARDA KULLANILAN KOMPOZİT YAPILARDA DELAMİNASYON MEKANİZMALARI VE TESPİT YÖNTEMLERİ

Arş. Gör. İlhan DANACI27

BÖLÜM 3

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN HAVACILIK UYGULAMALARINDA KULLANIMI

Arş. Gör. İlhan DANACI.....53

BÖLÜM 4

MÜHENDİSLİKTE KLASİK DÖNÜŞÜMLER: ZAMAN, FREKANS VE ÖLÇEK ANALİZİ

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI.....69

BÖLÜM 5

MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMLARI

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI.....95

BÖLÜM 6

KENTSEL VE ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE SU VERİMLİLİĞİ

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ.....104

BÖLÜM 7

PARAPROBİYOTİK ÜRETİMİNDE İLERİ SÜREÇ TEKNOLOJİLERİ VE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Öğr. Gör. Esen Bilge BİÇER.....143

BÖLÜM 8

GIDA ATIKLARININ DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE DÖNGÜSEL BİYOTEKNOLOJİ

Öğr. Gör. Esen Bilge BİÇER.....167

ÖN SÖZ

Üniversiteler, araştırma kurumları ve Ar-Ge Merkezleri yapmış oldukları çalışmalar ile sadece bilime katkı sağlamakla kalmaz aynı zamanda topluma daha iyi bir gelecek, toplumu refaha ulaştırmak, işbirlikleri ile toplumun kalkınmasına ve güçlü bir bilim ve teknoloji ekosistem oluşturmak amacıyla çalışmalar yaparlar. Bu kitabın amacı da gıda ve biyoteknoloji, mühendislikte ölçek analizi ve malzeme gibi konularda örnekler vererek oluşturulan ekosisteme katkı sağlamaktır. Bu kitap yapılan güncel araştırmaları ön plana çıkarmaktadır.

“Gıda Atıklarının Dönüştürülmesi Ve Döngüsel Biyoteknoloji”, “Paraprobiyotik Üretiminde İleri Süreç Teknolojileri Ve Mühendislik Yaklaşımları”, “Uçaklarda Kullanılan Kompozit Yapılarda Delaminasyon Mekanizmaları Ve Tespit Yöntemleri”, “Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Havacılık Uygulamalarında Kullanımı”, “Mühendislikte Klasik Dönüşümler: Zaman, Frekans Ve Ölçek Analizi”, “Kentsel Ve Endüstriyel Sistemlerde Su Verimliliği” ve “Kam Millerine Uygulana Kriyojenik İşlemin Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması” gibi güncel konular anlatılmıştır.

Bilim ve teknoloji baş döndürücü bir hızda ilerlerken, sunulan bu kitap araştırmacılara ve uygulayıcılara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

BÖLÜM 1

KAM MİLLERİNE UYGULANA KRİYOJENİK İŞLEMİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR ¹

Fatih ÖZAYDIN ²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146209>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. msimsir@cumhuriyet.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-8895-7821,

² ESTAS, Sivas, Türkiye. fatih.ozaydin@estas.com.tr, Orcid ID: 0000-0002-0089-373X,

GİRİŞ

Metallerin dondurulması, takım çeliklerinde aşınma direncinin süresini artırmak ve kalıntı gerilmeleri azaltmak için etkili bir yöntem olarak onlarca yıldır kabul edilmektedir (Pete,1993). Kriyojenik işlem, kaplamaların aksine, bileşenin tüm hacmini etkileyen, tek seferlik, kalıcı ve düşük maliyetli bir işlemdir. Bu yöntem, numunelerin yavaş bir hızla yaklaşık 93 °K seviyesindeki kriyojenik sıcaklığa kadar soğutulduğu, bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulduğu ve ardından oda sıcaklığına geri ısıtıldığı geleneksel ısıtılma ek bir süreçtir.

Araştırmacılar, bu işlem malzemede görünür bir değişiklik yaratmadığı ve mekanizması tam olarak öngörülemediği için başlangıçta şüpheyle yaklaşmışlardır (Pillai et al.,1986). -125 ila -196 °C aralığındaki derin kriyojenik işlem, sıradan soğuk işlemle elde edilenden daha üstün bazı özellikler sağlayabilmektedir (Nirmal et al.,2010; Mazor, et al., 2017; Collins & Dormer, 1997; Yen & Kamody, 1997).

Bu işlemin temel sonucu, östenitin tamamen martenzite dönüşmesi ve temperlenmiş martenzitik yapı içinde dağıtılmış çok küçük karbür tanelerinin oluşmasıdır (Paydar et al.,2014). Kriyojenik işlem, sıkça yanlış düşünüldüğü gibi, iyi bir ısıtılma işlemin yerine geçen bir yöntem değildir; bunun yerine, temperlemeden önce uygulanan, geleneksel ısıtılma tamamlayıcı bir süreçtir. Ancak, bazı iyileşmelerin, işlemin geleneksel ısıtılma işlem döngüsünün sonunda, yani bitmiş parçalar üzerinde uygulanmasıyla da elde edilebildiği rapor edilmiştir (Popandopulo & Zhukova, 1980).

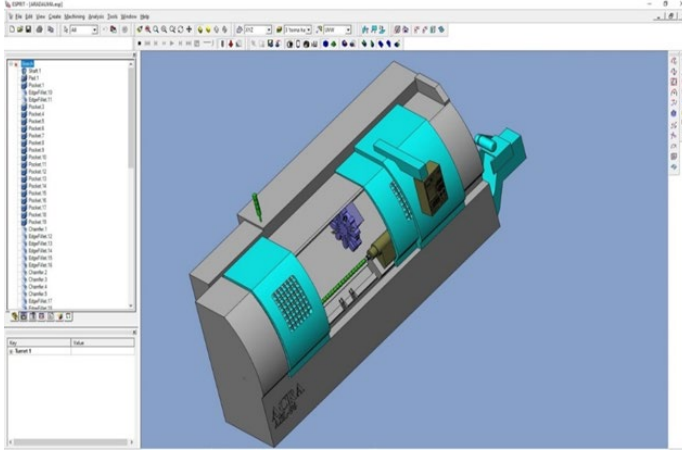
Bu çalışmada 8620H ve 16MnCr5 çeliklerinden üretilen kam mili numunelere kriyojenik ısıtılma işlem uygulanarak bu işlemin mikro yapı, kalıntı östenit hacim oranı, sertlik, darbe dayanımı ve aşınma dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Numune Üretimi

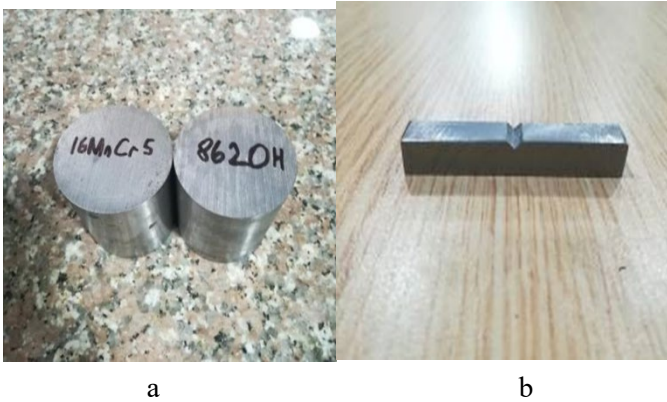
Çalışmalarda kullanılmak üzere gerekli olan 8620H ve 16MnCr5 kalitede ki ve 10x10x50mm boyutlarında ki darbe deney numunelerinin hatasız bir şekilde üretilmesi ve üretimde kullanılacak kesici takımların belirlenmesi için Esprit

CAM programı ile simülasyonu yapılmıştır (Şekil 1). Proses akış şemasına göre CNC torna, freze ve taşlama tezgâhlarında işlenerek numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Çelik kam mili, önce tornada işlenerek milin ön/arka yüzeylerinin kesilmesiyle şekillendirilmiş ve frezeleme işlemi, dış açma süreci ile tamamlanmıştır. Son aşamada ise dış köşenin taşlanması ve rulman yüzeylerinin taşlanmasıyla kam üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 1: Esprit model işleme verisi

Üretimleri tamamlanan numunelere polisaj işlemi uygulanarak yüzey pürüzlülüğü azaltılmış ve deneylerin yapılması için uygun yüzeye getirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: a) Çelik numunelerden alınmış kesit, b) Üretimi yapılan darbe numunesi

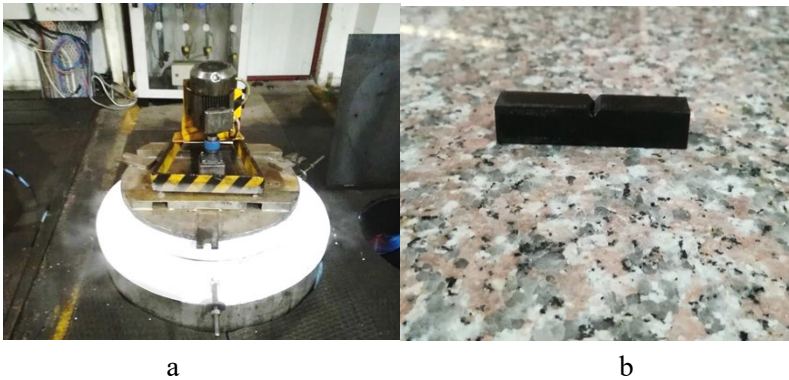
8620H ve 16MnCr5 kalitede ki çeliklerden üretilen numunelerin kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. 8620H ve 16MnCr5 çeliklerin kimyasal bileşimleri

Malzeme	%C	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Si	%S	%P
8620H	0,2	0,75	0,45	0,52	0,17	0,22	0,03	0,028
16MnCr5	0,18	1,15	-	0,95	-	0,23	0,02	0,02

Isıl İşlem süreçleri

Üretimi tamamlanan numunelere ısııl işlem uygulamaları yapılmıştır. İki farklı kalitedeki çelik numuneler için aynı ısııl işlemler uygulanmıştır. 8620H ve 16MnCr5 çeliğinden üretilen deney numunelerine ön ısııtma işleminden sonra endogaz (%20 CO, %40 N₂, %40 H₂) ortamında 925°C'de 1320 dakika boyunca sementasyon işlemi uygulanmıştır. 840°C olan sertleştirme sıcaklığına indirilerek 90 dakika bekletildi ve 60°C'deki yağ banyosunda 30 dk bekletilerek sertleştirme prosesi tamamlanmıştır. Sertleştirme işlemi sonrası numuneler -100°C'de 130 dakika boyunca kriyojenik işlem fırınında kriyojenik (sıfır altı, sub-zero) işleme tabi tutularak kalıntı östenitlerin dönüşümü sağlanmıştır (Şekil 3a). Daha sonra numuneler üzerindeki artık gerilmelerin giderilmesi için 180°C'de 120 dakika boyunca temperleme prosesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3b ısııl işlem sonrası darbe tokluğu numunesi görülmektedir.



Şekil 3: a) Kriyojenik işlem fırını, b) İşlem görmüş darbe numunesi

Numuneler uygulanan işleme göre yalnızca sementasyon işlemi uygulananlar (S), sementasyon+kriyojenik (S+K) işlem uygulananlar ve sementasyon+kriyojenik işlem+temperleme (S+K+T) işlemi uygulananlar olacak şekilde 3 gruba ayrılmıştır. Tablo 2 de numunelere uygulanan ısıt işlemler gösterilmiştir.

Tablo 2: 8620H ve 16MnCr5 çeliklerine uygulanan ısıt işlemler

	Sementasyon	Östenitleme	S	K	T
T, °C	925	840	60	-100	180
t, dk	1320	90	30	130	120

Metalografik Analiz

Isıl işlem görmüş numuneler, standart metalografik yöntemlerle (zımparalama, parlatma ve dağlama) mikroyapı analizi için hazır hale getirilmiş ve daha sonra % 2 nital dağlama sıvısı ile numuneler dağlanmış ve faz yapıları belirlenmiştir. Faz incelemesi sonrasında kalıntı östenit yapısı incelenmiş ve 5 farklı bölgeden ölçümler alınarak hacim oranı hesaplanmıştır. Numunelerin mikroyapı analizleri Nikon MA200 optik mikroskop altında incelenmiş ve Clemex Vision Lite görüntü analizi ile fazları analiz edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Optik Mikroskop ve görüntü analiz cihazı

Mekanik Testler

Sertlik Testi

Numunelerin sertlik değerleri yüzeyinden 1'er mm iç bölgelere ilerlenerek ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri 1 kgf yük qness mikro sertlik test cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5). Sertlik ölçümleri yüzeyden merkeze doğru 5 farklı bölgeden ölçümler alınarak yapılmıştır. Sertlik ölçüm değerleri her bir ısıtma işlemi için ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 5: Qness Q10A mikrosertlik cihazı

Aşınma Testi

Aşınma testleri için ısıtma işlemi görmemiş ve ısıtma işlemi görmüş koşullardaki numuneler aşınma testi için hazır hale getirilmiştir. Aşınma testi için UTS T10/20 marka pin-on disk tipi kuru sürtünme test düzeneği (tribometre) kullanılmıştır (Şekil 6). “Pin-on-disk” tipi kuru sürtünme testi ASTM G99-05 standardına uygun olarak, sabit yükte, sabit mesafede ve sabit dönme hızında gerçekleştirildikten sonra optik mikroskop ile aşınma yüzeyleri hem numune üzerinde hem aşındırıcı karşıt parça olan bilye üzerinde incelenmiş ve ölçümler yapılmıştır. ASTM G99-05 standardı aşınma hacminin ölçülmesini temel aldığından numune ve bilye üzerindeki aşınma hacimsel kayıpları doğrudan ölçüm ve ilgili standartta belirtilen matematiksel bağıntılar kullanılarak

hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan aşınma test parametreleri Tablo 3’de görülmektedir.



Şekil 6: Aşınma test cihazı

Tablo 3. Aşınma test parametreleri

Test Parametresi	Test
Aşındırıcı Bilye	100Cr6
Bilye Sertliği (HRC)	65
Bilye Çapı (mm)	5
Nominal Yük (N)	10
Disk Dönme Hızı (rpm)	300
Kayma Hızı (m/s)	0,095
Mesafe (m)	500
Sıcaklık (°C)	RT

Darbe Testi

Farklı parametreler altında ısıtılmış 16 adet darbe numunelerine 300 J kapasiteli Brooks marka Izod Charpy test cihazında çentik darbe deneyi yapılmıştır (Şekil 7). Deneyler 18.5 °C ortam sıcaklığında ve %43 nemli havada iki tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Darbe testi sonucu deney numunelerinin kırılma yüzeylerine SEM analizleri yapılarak kırılma yüzey morfolojisi incelenmiştir.

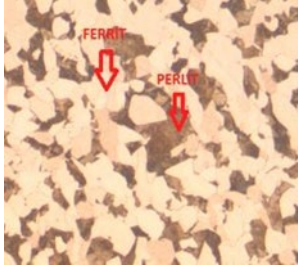
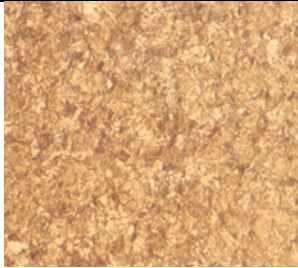
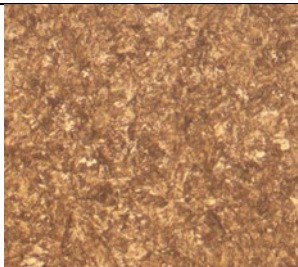
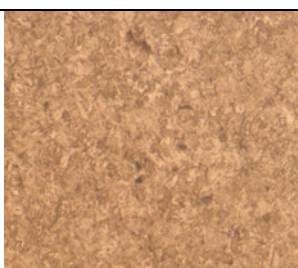


Şekil 7: Brooks marka darbe test cihazı

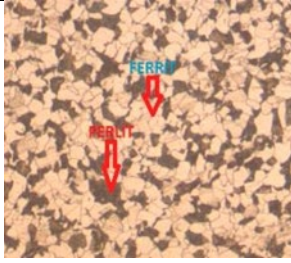
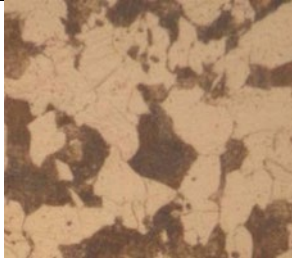
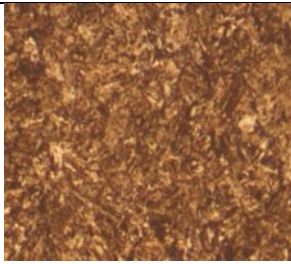
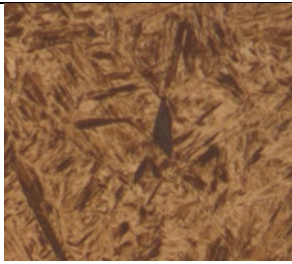
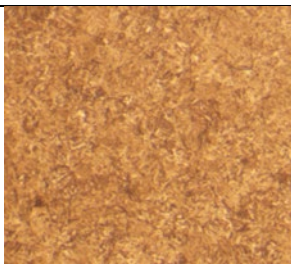
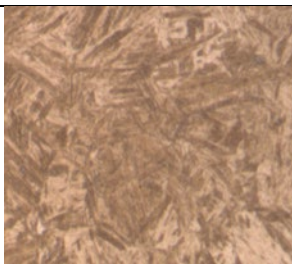
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Metalografik Sonuçlar

Isıl işlem görmüş numunelerin dağlama sonrası metalografik yapıları Şekil 8-9'da göstermektedir. Şekil 8-9 (a-b) işlemsiz haldeki 16MnCr5 ve 8620H numunelerinin mikro yapısında perlit ve ferrit gözlemlenmiştir. Şekil 8-9 (c-d) sementasyon işlemi sonrasında martenzit çok az denilecek şekilde oluşmuş ve kalıntı östenitler gözlemlenmektedir. Şekil 8-9 (e-f) görüntülerinde martenzit fazının kriyojenik işlemin de etkisiyle daha da belirginleşmiş ve martensit fazının malzeme yüzeyinde olduğu gözlemlenmiştir. Martensit fazının oluşumu difüzyonsuz bir dönüşüm olup, YMK yapıdan TMTaban merkezli tetragonal yapıya dönüşmektedir. Atomlar topluca kayma şeklinde hareket ederler (Otsuka & Wayman, 1998) Eğer dönüşüm kristalografik olarak tersinir ise, martensit aynı yönde ana faza geri dönüşür [Funakubo H., Application of shape memory alloys, Shape Memory Alloys, Gordon and Breach (1987) ([https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70128-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70128-0))]. Numunelerin yüzeyinden alınan ölçümlerde %15–25 oranında kalıntı (artık) östenite rastlanmıştır. Kalıntı östenit, su verme işleminden sonra çelikte östenitten dönüşmemiş martensitik yapı olarak adlandırılır. Kriyojenik işlem sonuçlarına göre, 16MnCr5 çeliğinde elde edilen kalıntı östenit miktarı 8620H çeliğine kıyasla daha yüksektir. Şekil 8-9 (g-h) martenzit yapısı gözlemlenmektedir. Numuneler uygulanan işleme göre yalnızca sementasyon işlemi uygulananlar (S), sementasyon ve kriyojenik işlem uygulananlar (S+K) ve sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulananlar (S+K+T) olacak şekilde 3 gruba ayrılmıştır.

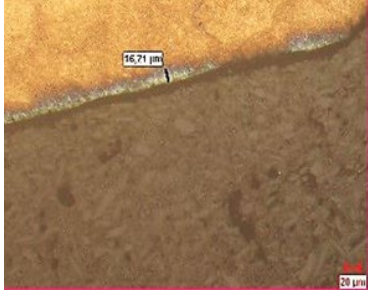
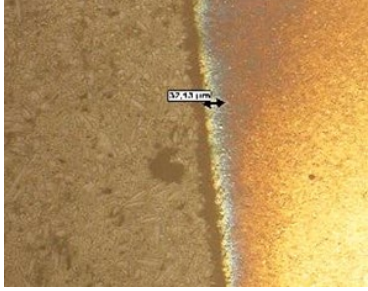
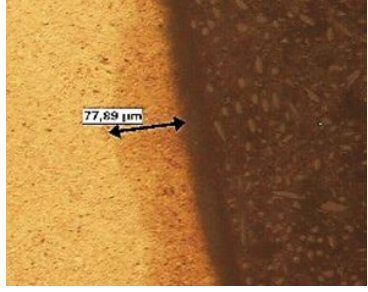
16MnCr5	100X		500X	
İşlemsiz	a		b	
Kalıntı Östenit	%50-60			
Sementasyon	c		d	
Kalıntı Östenit	%22-25			
Sementasyon + Kriyojenik	e		f	
Kalıntı Östenit	%6-8			
Sementasyon + Kriyojenik + Temperleme	g		h	
Kalıntı östenit	%3-5			

Şekil 8: 16MnCr5 çeliği mikroyapı görüntüleri; a) işlemsiz 100X, b) işlemsiz 500X, c) S 100X, d) S 500X, e) S+K 100X, f) S+K 500X, g) S+K+T 100X, h) S+K+T 500X,

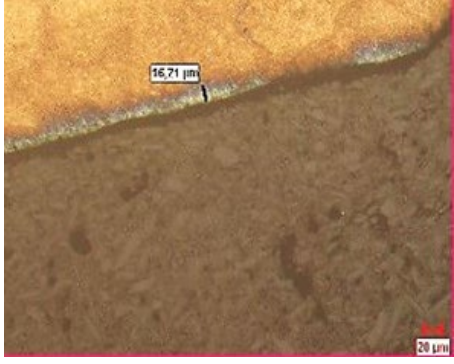
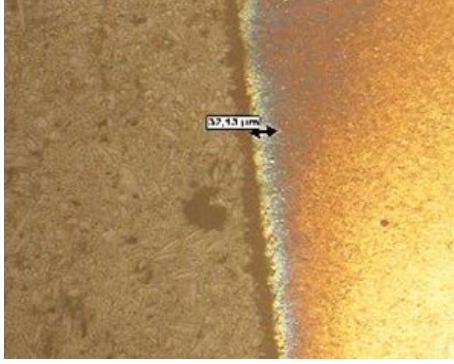
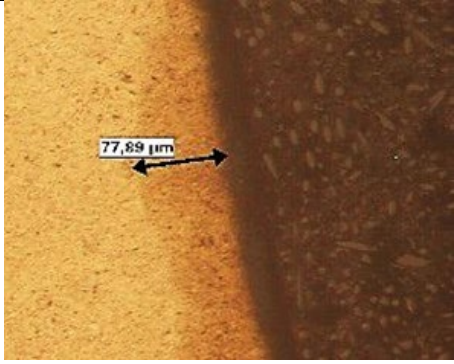
8620H	100X		500X	
İşlemsiz	a		b	
Kalıntı Östenit	%50-60			
Sementasyon	c		d	
Kalıntı Östenit	%21-24			
Sementasyon + Kriyojenik	e		f	
Kalıntı Östenit	%6-8			
Sementasyon + Kriyojenik + Temperleme	g		h	
Kalıntı Östenit	%5-6			

Şekil 9: 8620H çeliği mikroyapı görüntüleri; a) işlemsiz 100X, b) işlemsiz 500X, c) S 100X, d) S 500X, e) S+K 100X, f) S+K 500X, g) S+K+T 100X, h) S+K+T 500X,

Numunelerde sementasyon işlemi sonrası içyapısında gözlemlenen kalıntı östenitlerin detayı incelenmiş ve hacim oranları hesaplanmıştır (Şekil 10-11). Isıl işlemler sonucunda kalıntı östenit oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Numunelerin yüzeyinden alınan ölçümlerde, % 20-25'lik bir kalıntı östenit ile karşılaşmıştır. Kriyojenik işlem sonuçlarına göre, 16MnCr5 çelikte elde edilen kalıntı östenit miktarı 8620H'dekinden daha yüksektir (Tablo 4).

	100X	
Sementasyon	a	
Sementasyon + Kriyojenik	b	
Sementasyon + Kriyojenik + Temperleme	c	

Şekil 10: 16MnCr5 çeliği mikroyapı görüntüleri; a) S 100X, b) S+K 100X, c) S+K+T 100X

		100X
Sementasyon	a	
Sementasyon + Kriyojenik	b	
Sementasyon + Kriyojenik + Temperleme	c	

Şekil 11: 8620H çeliği mikroyapı görüntüleri; a) S 100X, b) S+K 100X, c) S+K+T 100X

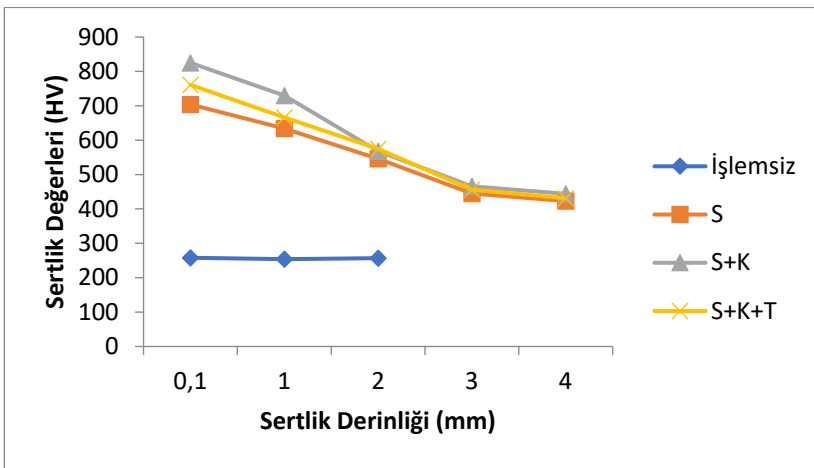
Tablo 4. Kalıntı östenit hacim oranları (S: Sementasyonlu, S+K: Sementasyon + Kriyojenik, S+K+T: Sementasyon +Kriyojenik + Temperleme)

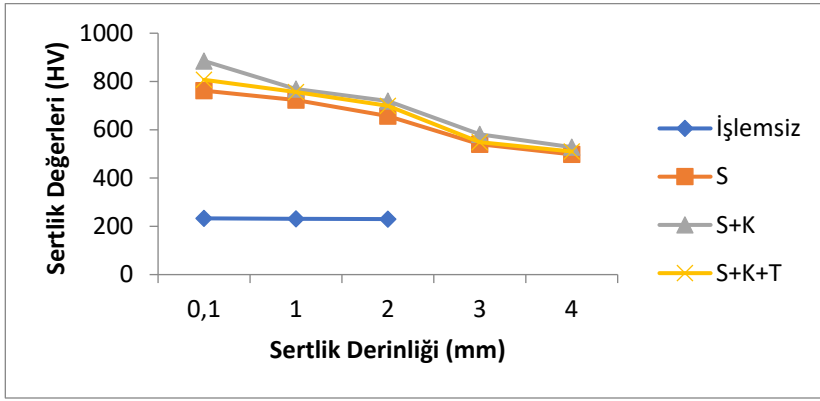
Malzeme	S	S+K	S+K+T
16MnCr5	%23,62	%7,90	%4,33
8620H	%22,55	%7,73	%4,19

Mekanik Test Sonuçları

Sertlik Analizleri

Isıl işlem öncesi ölçümlerde sertlik değerleri 16MnCr5 için 245 HB, 8620H için ise 221 HB değerleri gelmiştir. 2 farklı malzeme ile yapılan çalışmada, numune yüzeyine karbon emdirildikten (sementasyon) sonra yüzey sertliği artmıştır. Şekil 12’de numune yüzeyinden 4 mm’lik bir derinliğe kadar olan sertlik ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Sementasyon işlemi (karbon emdirme) sonrası numunelerin yüzey sertliği 705-760 HV arasında gelmiştir. Kriyojenik işleminden sonra, numunenin yüzey sertliği 825-885 HV’ye yükselmiştir. Sertlik ölçümlerinin sonuçlarına göre, kriyojenik işlem görmüş parçaların sertliği %14,5 artmıştır. Kriyojenik işlem görmüş numuneler temperlenmiş ve sonuç olarak sertlikte % 11’lik bir azalma ölçülmüştür.





b

Şekil 12: Sertlik değerleri; a) 16MnCr5, b) 8620H

8620H ve 16MnCr5 çelikler, 1,5-2,0 mm'lik bir derinlikten sonra sertlikte bir düşüş göstermiştir. Uygulanan kriyojenik işlemin sertlik üzerindeki etkisi 0,9 - 1,1 mm derinliğinden sonra azaldığı gözlemlenmiştir.

Aşınma Analizleri

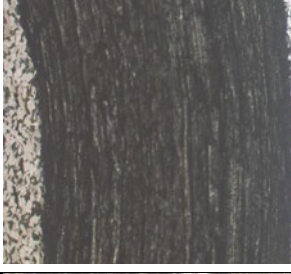
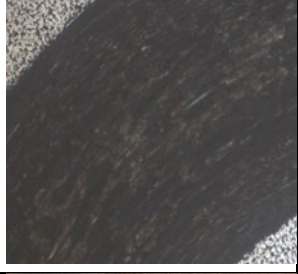
Al₂O₃ bilyesine karşı işlemsiz ve ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayısı-aşınma mesafesi grafikleri Tablo 5'de verilmiştir. 30N yük altında 500 m mesafesinde işlemsiz numunelerin ortalama sürtünme katsayısı 0.35-0,29 gelmiştir (Tablo 5). Sertleştirilmiş numunelerde düşük sürtünme

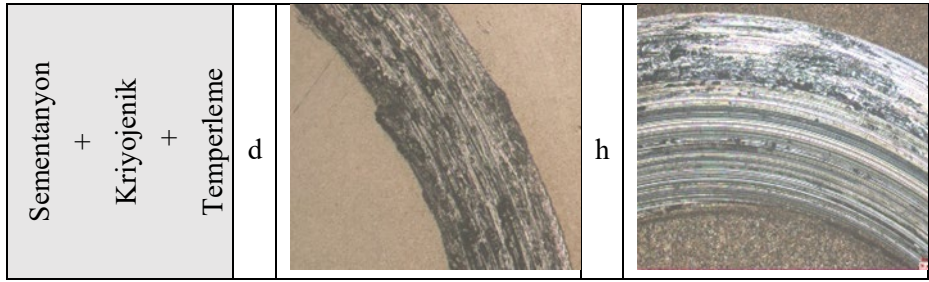
Tablo 5. Aşınma test sonuçları

Malzeme	Aşınma Sonuçları	İşlemsiz	S	S+K	S+K+T
16MnCr5	Ağırlık Kaybı (g)	0,1530	0,0301	0,0077	0,0203
	Sürtünme Katsayısı	0,5920	0,4131	0,3065	0,3512
8620H	Ağırlık Kaybı (g)	0,1410	0,0205	0,0050	0,0184
	Sürtünme Katsayısı	0,5184	0,3779	0,2119	0,2949

katsayıları gözlenirken bazı numunelerde yüksek sürtünme katsayısı gözlemlenmektedir, sebebi aşındırıcının aşınmaya neden olmasıdır. Kriyojenik işlem uygulaması ile yüzey sertliğini artırmakta sürtünme katsayısını ise azaltmaktadır. En düşük sürtünme katsayıları 8620H çelikte 0,21 olarak belirlenmiştir. Aşınma testinden sonra 3D temassız profilmeterler ile aşınma miktarları belirlenmiştir.

İşlemsiz koşullarındaki numunelerinin aşınmış yüzeylerinin 100X büyütmede optik mikroskop görüntüleri (Şekil 13 a-e) incelendiğinde 30N yük altında adhezif bir aşınma mekanizması görülmektedir. Isıl işlem görmüş numunelerinin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri (Şekil 13 b-h.) incelendiğinde abrasif aşınma olduğu görülmektedir.

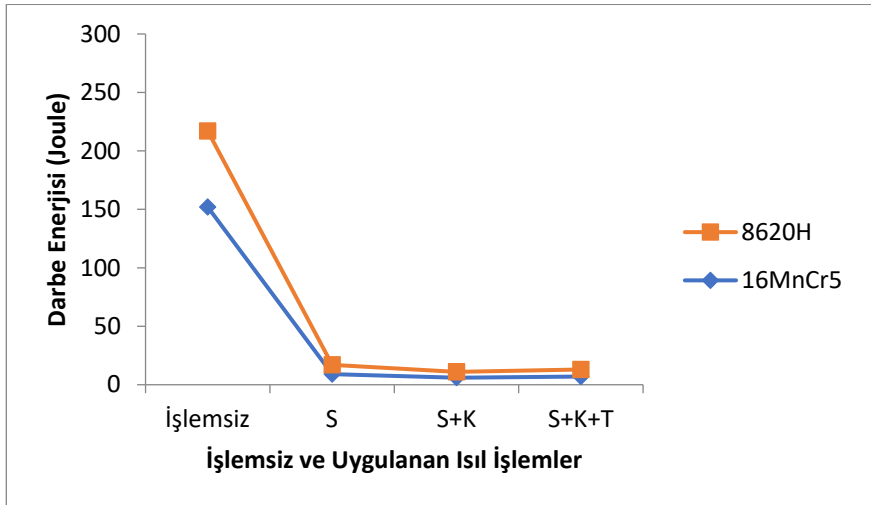
	16MnCr5		8620H	
İşlemsiz	a		e	
Sementasyon	b		f	
Sementasyon + Kriyojenik	c		g	



Şekil 13: Aşınma yüzeyleri mikroyapı görüntüleri 100X; a) işlemsiz 16MnCr5, b) S-16MnCr5, c) S+K-16MnCr5, d) S+K+T-16MnCr5, e) işlemsiz 8620H, f) S-8620H, g) S+K-8620H, h) S+K+T-8620H

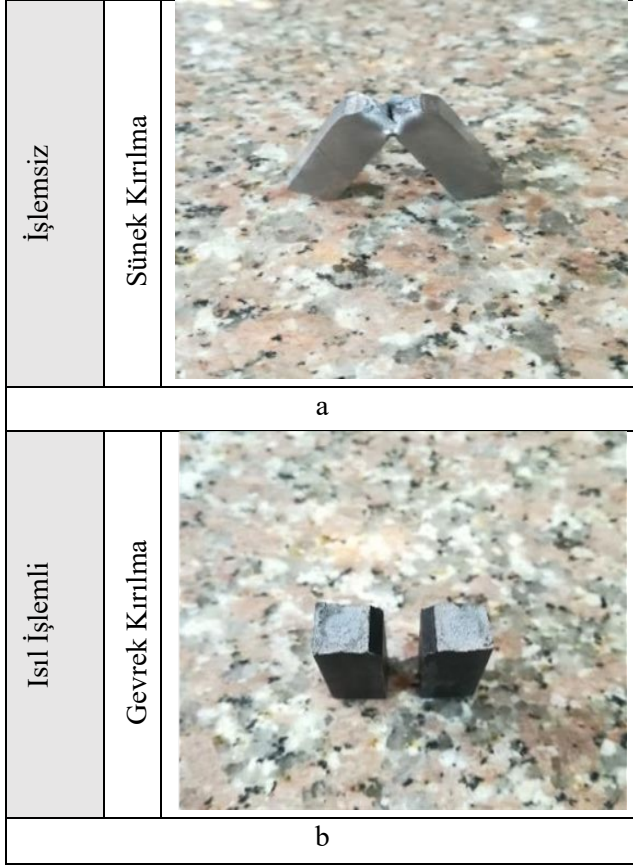
Darbe Tokluğu Analizleri

Isıl işlem görmemiş (işlemsiz) numunelerin sertliği yukarıda anlatıldığı gibi düşük ölçülmüştü. Darbe tokluğu sertlik ve/veya sertleşebilirlik ile ters orantılıdır. Darbe tokluğu testi sonucunda işlemsiz numunelerde malzeme tarafından emilen enerji (darbe enerjisi) miktarı yüksek ölçülmüştür. Şekil 14’de darbe değerleri verilmiştir. Isıl işlem görmüş numunelerde ise malzem tarafından emilen enerji miktarı çok çok az olduğu ölçülmüştür.



Şekil 14: Darbe tokluğu test sonuçları

Şekil 15a ve 15b sırasıyla ısıl işlem görmemiş ve görmüş numunelerin darbe tokluğu testi sonrası kırılma yüzeyleri görülmektedir.



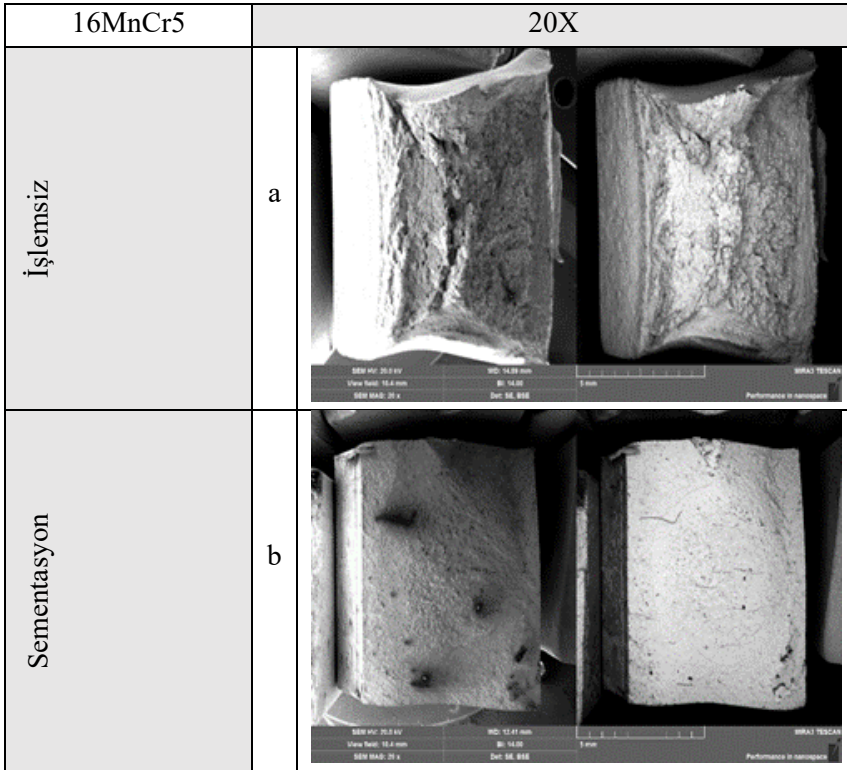
Şekil 15: Darbe tokluğu test sonucu numunelerin kırılma yüzeyleri; a) sünek kırılma, b) gevrek kırılma

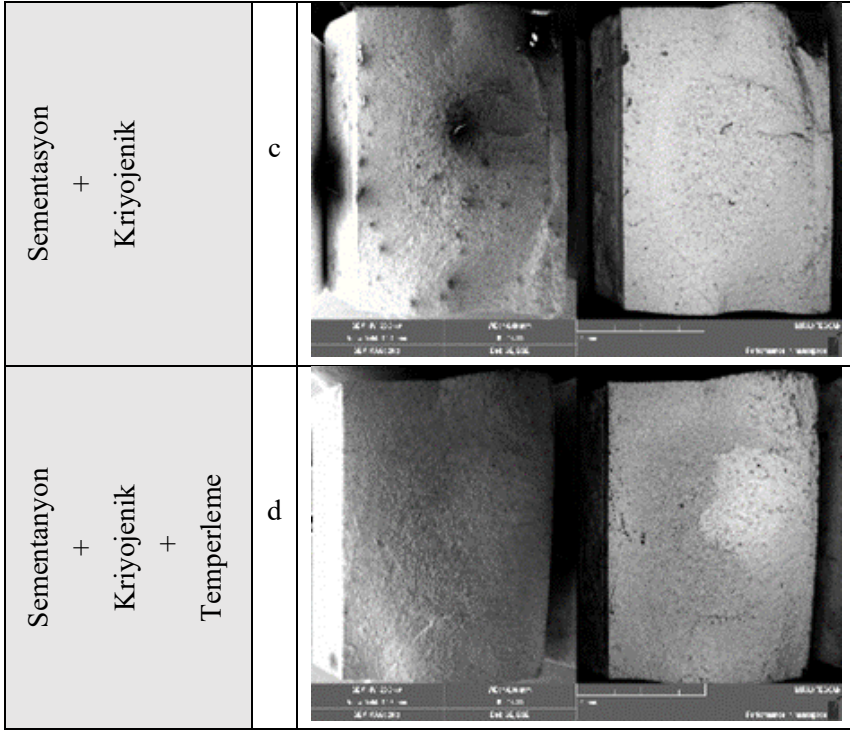
Isıl işlemsiz numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılmanın olduğu görülmektedir. Numune kenarlarda deformasyonun, pütürlü ve yırtılma şeklinde kırılma yüzeyi olduğu görülmektedir. Isıl işlem görmüş numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde numune kenarlarında sementasyondan dolayı gevrek kırılmanın, numune ortasında yine gevrek kırılma olduğu görülmektedir. Numune kenarları 45°'lik eğimli olduğu keskin, düz bir yüzey görülmektedir. Bu bölgede sementasyondan dolayı karbon (C) miktarı

yüksektir. Numunede kenardan merkeze doğru gittikçe karbon miktarı ana metalin karbon değeri kadar olup % 0,18-0,22 C arasına olup sertleşme yüzey kadar olmamakla birlikte kriyojenik işlemten dolayı biraz yüksektir. Merkez yüzeyi incelendiğinde ise düz ve parlak şeklinde bir yüzey görülmektedir. Dolayısıyla merkezde de gevrek kırılma olduğu anlaşılmaktadır.

SEM Analizi Sonuçları

Şekil 16-a'da 16MnCr5 işlemsiz olarak sünek kırılma göstermiştir. Bundan dolayı kayma dudakları mevcuttur ve daha hasarlı bir kırılma görülmüştür. Absorbe ettiği darbe enerjisi diğer numunelere göre çok daha fazladır. Şekil 16-b'de sementasyon işlemi uygulanmış numunede gevrek kırılma mevcuttur. Gevrek ile sünek gölgenin ayırımı ortadaki geçiş bölgesinden anlaşılabilir.



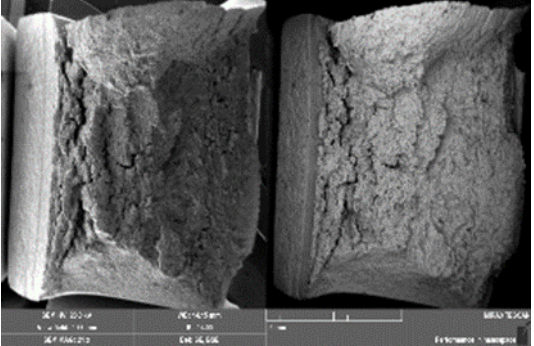
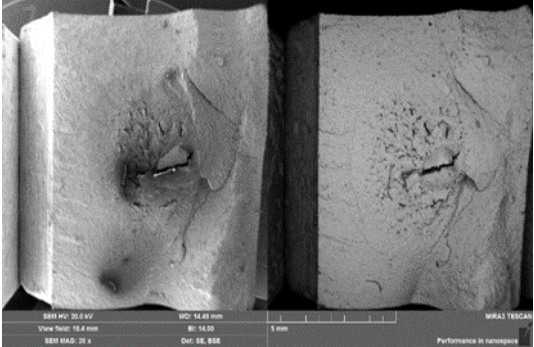
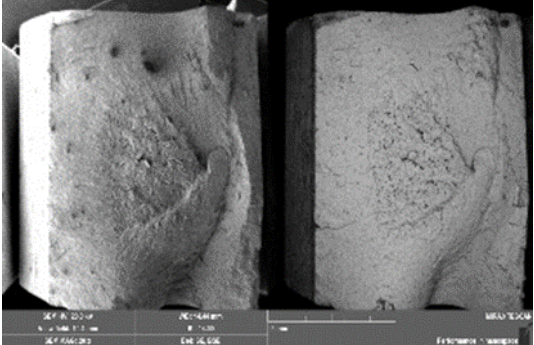


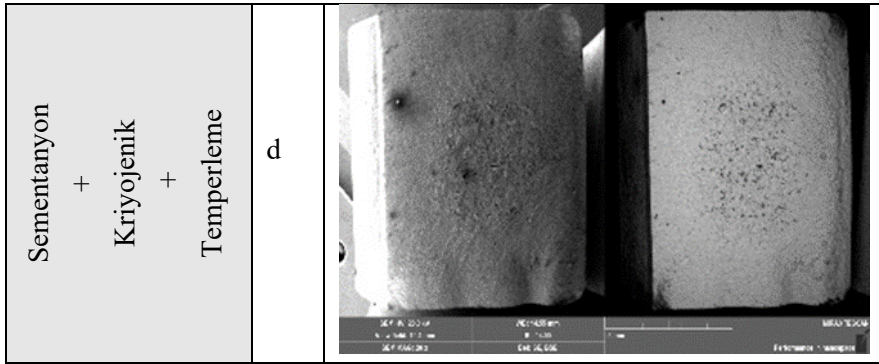
Şekil 16: 16MnCr5 çelik numunelerin kırılma yüzeyleri SEM analizi, 20X; a) İşlemsiz, b) Sementasyon, c) Sementasyon ve kriyojenik işlem, d) Sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme

Şekil 16-c’de geçiş bölgesi sementasyon ve kriyojenik işlem uygulanmış numunede daha az belirgindir. Gevrek kırılma meydana gelmiştir. Şekil 16-d’de sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme uygulanmış numunede geçiş bölgesi görünmemektedir. Gevrek kırılma görülmüştür. Tüm görüntüler 20X de alınmıştır.

8620H çeliğinin kırılma yüzeyleri Şekil 17’de 20X büyütme ile verilmiştir. ısıt işlemsiz numunenin kırılma yüzeyi Şekil 17a’da sünek kırılma olarak görülmektedir. Hasarlı bir kırılma olmuştur. Absorbe ettiği darbe enerjisi diğer numunelere göre çok daha fazladır. Şekil 17b’de gevrek kırılma sonrası yırtılma meydana gelmiştir yüzeyde. Ayrıca dairesel bir zone ile gevrek-sünek bölge ayrımı olmuştur. Sertleştirme derinliği buradan anlaşılabilir. Şekil

17c’de gevrek kırılma göstermiştir. Gevrek alan daha da fazlalaşmıştır. Şekil 17d’de sertleştirme derinliği daha fazladır. Gevrek kırılma göstermiştir.

8620H	20X	
İşlemsiz	a	
Sementasyon	b	
Sementasyon + Kriyojenik	c	



Şekil 17: 8620H çelik numunelerin kırılma yüzeyleri SEM analizi, 20X; a) İşlemsiz, b) Sementasyon, c) Sementasyon ve kriyojenik işlem, d) Sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme

GENEL SONUÇLAR

Sementle edilmiş, kriyojenik işlem görmüş ve temperlenmiş 8620H, 16MnCr5 çelik numunelerde sertlik, aşınma, darbe dayanımı ve mikroyapı özellikleri etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Sementasyon işleminden sonra yapılan kriyojenik işlem ile östenit miktarı %80-85 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Kalıntı östenit miktarındaki artışın sertliği olumsuz etkilediği görülmektedir. Kalıntı östenit miktarındaki azami azalma, 8620H çelik numunesinde gözlenmiştir. Sementasyon sonrası bulunan yüksek miktarda östenit, makine parçalarının aşınma direncini ve yorulma sınırını azalttığından, minimumda tutulmalıdır. Çelik numuneleri, 30N'lik bir yük altında 500m'lik bir mesafede bir aşınma testine tabi tutularak sertleştirilmiş numunelerin aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. En iyi aşınma direnci 8620H çelik numunesinde 0,0050g olarak gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Collins D.N., & Dormer J., (1997). Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel, *Heat Treatment Met.* 3. [https://doi.org/ 10.1007/s40544-015-0089-z](https://doi.org/10.1007/s40544-015-0089-z)
- Mazor G., Ladizhensky, I., Shapiro, A., (2017). Influence of cryogenic cooling rate on mechanical properties of tool steels. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/244/1/012005>
- Nirmal S., Kalsi R., Sengal, Vishal S. S., (2010). Cryogenic treatment of tool materials, pp. 1077-1100. <https://doi.org/10.1080/10426911003720862>
- Otsuka, K., Wayman, C.K., (1998) *Shape Memory Materials*, 1.Baskı, Cambridge University Press,
- Paydar, H., Amini, K., Akhbarizadeh, A., (2014). Investigating the effect of deep cryogenic heat treatment on the wear behavior of 100Cr6 alloy steel pp.163-169. <https://doi.org/10.4149/km.2014.3.163>
- Pete, P. (1993). Frozen gears. *Gear Technology*, 10(2), 26-29. https://www.researchgate.net/publication/279581871_Frozen_gears
- Pillai, R.M, Pai, B.C., Satyanarayana, K.G., (1986). Deep cryogenic treatment of metals. *Tools Alloy Steels*, pp 205-208 <https://doi.org/10.1080/10426910902809743>
- Popandopulo N., Zhukova L.T., (1980). Transformation in high speed steels during cold treatment, *Met. Sci. Heat Treatment* 22 pp.708-710 <https://doi.org/10.1007/BF00700561>.
- Yen, P., & Kamody, D.J. (1997). Formation of fine eta carbides in special cryogenic and tempering process key to improved properties of alloy steels. *Industrial Furnace* 64, 40-44.
- Funakubo H., (1987). Application of shape memory alloys, *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70128-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70128-0).

BÖLÜM 2

UÇAKLARDA KULLANILAN KOMPOZİT YAPILARDA DELAMİNASYON MEKANİZMALARI VE TESPİT YÖNTEMLERİ

Arş. Gör. İlhan DANACI ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146290>

¹ Department of Aeronautical Engineering, Sivas University of Science and Technology, Sivas, Türkiye, idanaci@sivas.edu.tr , Orcid ID: 0000-0002-9148-1481.

GİRİŞ

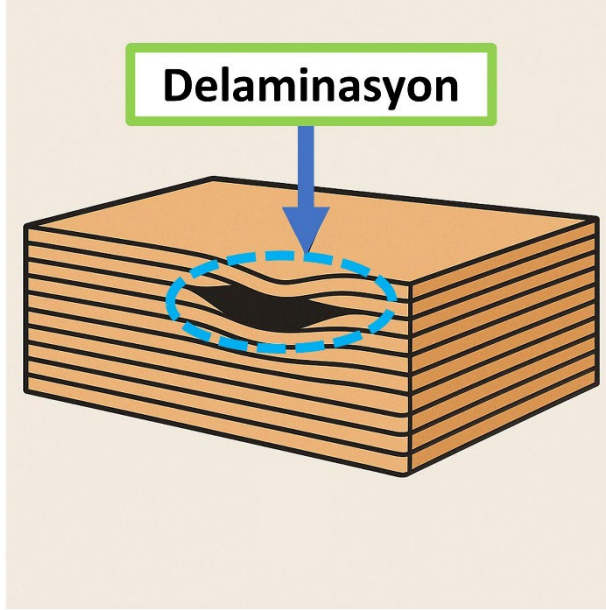
Kompozit malzemelerin hava aracı yapılarında kullanımı, son otuz yılda havacılık sektöründe bir dönüşüm yaratmış; özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler, yüksek özgül dayanım, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve tasarım esnekliği sayesinde modern uçakların yapısal elemanlarında temel malzeme sınıfı hâline gelmiştir (Baker, Dutton, & Kelly, 2004; Soutis, 2005). Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A350 gibi yeni nesil ticari uçaklarda kompozit oranının gövde ve kanat bileşenlerinde %50'nin üzerine çıkması, bu malzemelerin yapısal önemini açıkça ortaya koymaktadır (AZoM, 2012; Marsh, 2015; Danaci, 2023).

Kompozit malzemelerin üstün özelliklerine rağmen, bu yapıların servis sırasında karşılaştığı en kritik hasarlardan biri **delaminasyondur**. Delaminasyon, kompozit laminatın katmanları arasındaki bağın zayıflaması veya tamamen ayrılması nedeniyle oluşan interlaminar bir hasar türüdür (Huang & Bobyr, 2023; Talreja & Singh, 2012). Delaminasyon kısaca, kompozit malzemenin katmanlarının birbirinden ayrılmasıdır. Kompozitleri bir milföy hamuru gibi düşünmek mümkündür: Birçok ince katman üst üste konur, reçine ile yapıştırılır ve dayanıklı bir yapı elde edilir. Uçaklarda kullanılan karbon fiber kompozitler de bu katmanlı yapıya sahiptir. Normalde bu katmanlar çok sağlam şekilde birbirine bağlıdır, yükü birlikte taşır ve uçağın dayanımını artırır (Danaci, 2023). Ancak bazı durumlarda katmanların arasındaki bu bağ bozulur ve arada küçük bir boşluk oluşur; işte buna delaminasyon denir. Bu hasar, düşük enerjili darbelerle (örneğin apron ekipmanı çarpmaları), üretim sırasında oluşan kusurlarla, nem ve sıcaklık etkileriyle veya tekrarlı yükler altında ortaya çıkabilir (Kreculj & Rašuo, 2011; Thankachen, 2018). CFRP malzemelerde delaminasyon, çoğu zaman dış yüzeyde belirgin bir iz bırakmadığı için **Barely Visible Impact Damage (BVID)** olarak adlandırılır ve bu durum, tespit edilmesini zorlaştırarak uçuş güvenliği açısından doğrudan risk oluşturur (Kreculj & Rašuo, 2011; Francesconi, Loi, & Aymerich, 2023).

Delaminasyonun mekanik davranış üzerine etkileri oldukça kritiktir. Katmanlar arasındaki ayrılma, yük transfer mekanizmasını bozar, panelin rijitliğini azaltır ve özellikle basma yükleri altında burkulma ve **Compression After Impact (CAI)** dayanımında ciddi kayıplara yol açar (Chang, 2012; Talreja & Singh, 2012). Bu nedenle delaminasyon hasarının mekanizmalarının anlaşılması,

tespit yöntemlerinin geliştirilmesi ve hasar toleransı tasarımının güçlendirilmesi, havacılık yapılarının güvenilirliği için zorunludur.

Bu kitap bölümü, uçak kompozit yapılarında delaminasyonun oluşum mekanizmalarını, tespit yöntemlerini ve hasar toleransı perspektifinden değerlendirilmesini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlayan bir derlemedir. Çalışmanın literatür odaklı olması, hem mevcut bilgi birikiminin sistematik bir şekilde sunulmasını hem de araştırmacılara güncel yaklaşımları tek bir kaynak üzerinden takip etme imkânı sağlamaktadır (Baker et al., 2004; Talreja & Singh, 2012). Bölümün devam eden kısımlarında, öncelikle CFRP ve benzeri kompozit yapılarda delaminasyonun temel mekanizmaları ele alınacak, ardından ultrasonik testlerden termografiye, X-ray görüntülemeye kadar modern tahribatsız muayene yöntemleri ayrıntılı olarak incelenecek ve son bölümde delaminasyonun yapısal davranış üzerindeki etkileri ile hasar toleransı yaklaşımları tartışılacaktır.



Şekil 1. Delaminasyon örneği

DELAMİNASYONUN TEMELLERİ

Kompozit malzemelerde delaminasyon, katmanlar arasındaki bağın kopması veya zayıflaması sonucu ortaya çıkan, özellikle CFRP yapılar için kritik bir hasar türüdür (Huang & Bobyr, 2023; Talreja & Singh, 2012). Delaminasyonun temel nedeni; fiber yönlenmesi, matris yapısı, ara yüz bağ mukavemeti ve dış yükleme koşulları gibi çok sayıdaki parametreye bağlı olarak interlaminar gerilmelerin ortaya çıkmasıdır. Katmanlı yapının doğası gereği, kompozitlerde fiberlerin taşıyabileceği yük oldukça yüksek iken, katmanlar arasındaki bağ çoğunlukla reçine tarafından sağlanan nispeten zayıf bir yapıdır. Bu nedenle delaminasyon, kompozit yapılar içinde en yaygın ve en tehlikeli hasar türlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Talreja & Singh, 2012).

Düşük enerjili darbeler, üretim sırasında oluşan boşluklar, termal genleşme farklılıkları veya tekrarlı yükler sonucunda matriste oluşan mikro çatlaklar bir süre sonra katmanlar arası ara yüzü etkileyerek delaminasyonu başlatabilir (Kreculj & Rašuo, 2011; Thankachen, 2018). Bu durum özellikle uçak yapılarında önemli bir problem oluşturur çünkü delaminasyon çoğu zaman dış yüzeyde görünür bir hasar bırakmaz. Bu nedenle Barely Visible Impact Damage (BVID) olarak adlandırılır ve tespiti zor olduğu için yapısal bütünlük açısından ciddi risk taşır (Kreculj & Rašuo, 2011).

Delaminasyonun kompozit yapı üzerindeki etkileri oldukça geniştir. İlk aşamada panel rijitliğinde azalma, yük taşıma kapasitesinde düşüş ve gerilme dağılımında bozulma meydana gelir. Hasar ilerledikçe katmanlar arasında kayma, ayrılma ve yük aktarımının ortadan kalkması gibi etkiler ortaya çıkar. Bu durum özellikle basma yükleri altında delaminasyon bölgesinde erken burkulma, kanat veya gövde panellerinde ise yerel zayıflama ile sonuçlanır (Chang, 2012; Talreja & Singh, 2012). Literatürde, delaminasyon büyüklüğünün artmasıyla Compression After Impact (CAI) dayanımının belirgin şekilde azaldığı gösterilmiştir (Francesconi et al., 2023; Kreculj & Rašuo, 2011).

Delaminasyonun temelinde, kompozit laminatın anizotropik yapısından kaynaklanan mod I (açılma), mod II (kayma) ve mod III (burulma) gerilmeleri yer almaktadır. Katmanların birbirine göre davranışı bu modların birleşik etkisine göre şekillenir ve bu durum, özellikle karma yüklemeler altında delaminasyonun hızla ilerlemesine neden olabilir (Talreja & Singh, 2012). Bu nedenle delaminasyonun incelenmesi, yalnızca hasarın görünümü ile değil,

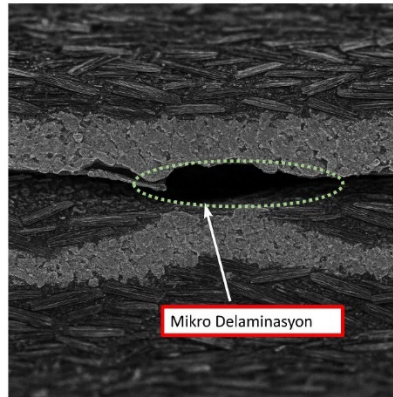
aynı zamanda kompozit malzemenin mikromekanik özellikleri ve lif-matris arayüzünün dayanımı ile birlikte ele alınmalıdır (Huang & Bobyr, 2023; Talreja & Singh, 2012).

DELAMİNASYONUN OLUŞUM MEKANİZMALARI

Kompozit malzemelerde delaminasyon, hem üretim aşamasında hem de servis koşullarında karşılaşılan çeşitli mekanizmalar sonucunda meydana gelmektedir. Uçak yapılarında kullanılan CFRP kompozitler, yüksek mekanik performanslarına rağmen katmanlı yapıları nedeniyle interlaminar gerilmelere karşı hassastır. Bu nedenle delaminasyon oluşum mekanizmalarının detaylı olarak anlaşılması hem tasarım hem de bakım süreçlerinin doğru yönetilebilmesi açısından büyük önem taşır (Baker et al., 2004; Chang, 2012).

Üretim Kaynaklı Delaminasyon

Delaminasyonun önemli bir kısmı, kompozit parçanın üretimi sırasında ortaya çıkan kusurlarla ilişkilidir. Reçinenin katmanlar arasına tam olarak nüfuz edememesi, fiberlerin yanlış yerleşimi, katman kaymaları, düşük konsolidasyon basıncı ve üretim ortamındaki nem gibi faktörler, interlaminar bağın zayıf oluşmasına yol açar (Baker et al., 2004). Bu kusurlar “voids” olarak adlandırılan boşlukların oluşmasına neden olur ve bu boşluklar ilerleyen süreçte mikro çatlaklara dönüşerek delaminasyonun başlangıç noktası hâline gelir.



Şekil 2. Mikro Delaminasyon örneği

Otoklav prosesinde basınç ve sıcaklığın doğru ayarlanmaması da katmanlar arasında yeterli bağ oluşmamasına neden olabilir. Özellikle büyük uçak gövde panellerinin üretiminde, reçinenin homojen dağılmaması veya lif yönlerinin kayması delaminasyon riskini önemli ölçüde artırmaktadır (Marsh, 2015). Üretim kaynaklı delaminasyonlar, parçanın kullanım ömrü boyunca önemli mekanik zayıflıklara yol açabilir.

Servis Sırasında Oluşan Delaminasyon

Servis koşulları, kompozit yapılarda delaminasyonun en yaygın görüldüğü süreçtir. Uçaklar uçuş sırasında tekrarlanan yükler, yüksek frekanslı titreşimler, basınç dalgalanmaları ve ani kuvvet değişimleri gibi çeşitli dış etkilere maruz kalır. Bu yükleme türleri, özellikle fiber-matris ara yüzünde mikro çatlakların oluşumuna neden olabilir (Talreja & Singh, 2012). Mikro çatlakların zaman içinde birleşerek katmanlar arası bağları zayıflatması delaminasyona yol açar. Termal çevrimler de servis kaynaklı delaminasyon mekanizmalarının önemli bir parçasıdır. Farklı yönlerde yerleştirilmiş katmanların termal genleşme katsayılarının birbirinden farklı olması, uçuş boyunca sık tekrarlanan sıcaklık değişimleri ile birleştiğinde interlaminar kesme gerilmelerinin ortaya çıkmasına neden olur (Thankachen, 2018; Talreja & Singh, 2012). Bu gerilmeler, özellikle yüksek irtifa uçuşlarında ve gövde-kanat bağlantılarında delaminasyon gelişimini hızlandırabilir.

Darbe Kaynaklı Gizli Hasar (BVID)

Düşük enerjili darbeler sonucunda kompozit yapılarda oluşan hasarlar çoğu zaman dışarıdan görünmez. Bu tür hasarlar Barely Visible Impact Damage (BVID) olarak tanımlanır. Uçak bakım ekipmanlarının çarpması, apron araçları ile manevralar, kuş çarpması, dolu yağışı veya bakım sırasında yanlış müdahaleler CFRP panellerde BVID oluşumuna neden olabilir (Kreculj & Rašuo, 2011; Thankachen, 2018). BVID, özellikle delaminasyonun kritik bir başlangıç mekanizmasıdır ve panelin servis ömrü boyunca büyüyebilir. Darbe kaynaklı hasarlar genellikle matris çatlakları, fiber kırılması ve ara yüz zayıflaması ile başlar. Bu lokal hasarlar katmanlar arasında şekil değişimine neden olarak delaminasyonun ilerlemesine yol açar (Chang, 2012). BVID'in tespit edilmesinin zor olması, yapısal bütünlük açısından ciddi risk oluşturur ve bu nedenle modern uçaklarda delaminasyon odaklı bakım ve tahribatsız muayene yöntemleri büyük önem taşımaktadır (Katunin, Dragan, & Dziendzikowski, 2015).

Çevresel Etkiler ve Kimyasal Bozulmalar

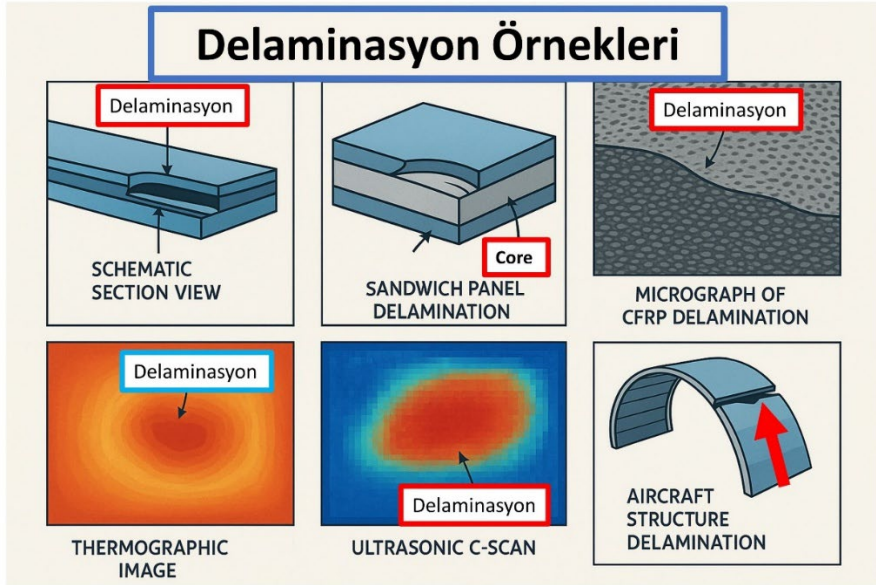
Nem alımı, UV ışınımı, yakıt buharları ve kimyasal temaslar CFRP malzemelerde matrisi zayıflatarak delaminasyon riskini artırır. Özellikle epoksi reçinelerin uzun süreli nem maruziyeti altındaki performansı düşmekte ve fiber-matris ara yüzünde hidrotermal bozulmalar oluşmaktadır. Bu durum, interlaminar kayma dayanımının azalmasına ve delaminasyonun daha kolay başlamasına neden olur (Talreja & Singh, 2012).

Ayrıca, uçak gövde panellerinin farklı bölgelerinde görülen sıcaklık gradyanları da katmanlar arasında genleşme farkları oluşturarak ek gerilmeler doğurur. Özellikle iniş takımı yuvaları ve motor çevresi gibi yüksek sıcaklık bölgelerinde termomekanik yüklemelerin delaminasyon başlatıcı etkisi daha belirgindir (Chang, 2012).

Yıldırım Çarpması ve Elektriksel Etkiler

Modern uçakların büyük oranda kompozit malzemelerden üretilmesi, yıldırım çarpması sırasında hasar oluşma riskini artırmıştır. CFRP yapılar, metalik malzemelere kıyasla daha düşük elektrik iletkenliği gösterir. Bu nedenle yıldırım akımı kompozit yüzeylerde lokal ısı artışlarına ve reçine yanmalarına neden olabilir. Bu termal şok, katmanlar arasında ani genleşme farkları oluşturarak delaminasyon başlatabilir (Zhang et al., 2016).

Uçakta kullanılan metal mesh veya iletken kaplamalar yıldırım etkisini azaltmaya yardımcı olsa da, kompozit yapıların yıldırım karşısındaki davranışı hâlâ önemli bir araştırma konusudur (Kul et al., 2020; Tiwari & Jha, 2013; Zhang et al., 2016).



Şekil 3. Bazı Delaminasyon örnekleri

DELAMİNASYONUN TESPİT YÖNTEMLERİ (NDT TEKNİKLERİ)

Uçak kompozit yapılarında delaminasyon, çoğunlukla dış yüzeyde belirgin bir iz bırakmadığından tahribatsız muayene (Non-Destructive Testing, NDT) yöntemlerinin kullanılması hem bakım hem de yapısal sağlık izleme açısından kritik önem taşımaktadır. Modern hava araçlarında kompozit oranının artmasıyla birlikte NDT yöntemlerinin çeşitliliği, hassasiyeti ve otomasyon düzeyi de gelişmiştir (Gholizadeh, 2016; Katunin et al., 2015). Bu bölümde, delaminasyonun tespitinde yaygın kullanılan temel teknikler ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

Ultrasonik Test Yöntemleri (A-Scan, B-Scan, C-Scan)

Ultrasonik muayene, kompozit yapılarındaki delaminasyonun tespitinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Temel prensip, yüksek frekanslı ultrason dalgalarının malzeme içine gönderilmesi ve iç yapıdan geri yansıyan sinyallerin analiz edilmesine dayanır (Gholizadeh, 2016). **A-Scan (Zaman-Genlik Görüntüsü):**A-Scan tekniğinde probdan gönderilen ultrason dalgası katman içinde ilerler ve ara yüzlerde yansıyarak geri döner. Delaminasyon bölgelerinde yansımalar **normalden daha yüksek genlik** üretir. Katman ayrılımlarında **ek**

yansıma yüzeyleri oluşur. Bu yöntem hızlıdır ancak geniş alan taramalarında sınırlı bilgi sağlar. **B-Scan (Kesit Görünümü)**: B-Scan, kompozit malzemenin iç yapısının iki boyutlu bir kesit görüntüsünü sağlar. Delaminasyon bölgeleri; Kesitte “boşluk” veya “karanlık alan” şeklinde görülür. B-Scan özellikle kalın panellerde etkili olan bir yöntemdir. **C-Scan (Planar görüntü – En Yüksek Kesinlik)**: C-Scan yöntemi, delaminasyon tespitinde en belirgin ve hassas sonuçları sunar. Yüzey altı kusurların **iki boyutlu haritalaması** yapılır. Delaminasyonun yerini, büyüklüğünü ve şeklini yüksek çözünürlükle gösterir. C-Scan, uçak bakım endüstrisinde en yaygın kullanılan ultrasonik tekniktir ve özellikle Boeing 787, Airbus A350 gibi modern kompozit gövdeli uçaklarda standart bakım prosedürlerinin bir parçasıdır (Katunin et al., 2015; Marsh, 2015).

Termografi (Kızılötesi Termal Muayene)

Termografi, malzemeye ısı uygulanmasıyla veya doğal termal davranışın ölçülmesiyle delaminasyonun yüzey sıcaklık dağılımlarından tespit edilmesine dayanır. **Aktif Termografi**; Dış kaynaklı bir enerji (halojen lamba, flaş, lazer) uygulanır. Delaminasyon bölgelerinde; Isı iletkenliği düşüktür bu nedenle yüzeyde **sıcak/soğuk lekeler** oluşur. Bu yöntem özellikle büyük panellerde hızlı tarama için uygundur. **Pasif Termografi**; Enerji uygulanmadan, malzemenin doğal sıcaklık değişimleri izlenir. Motor bölgesi gibi **sıcak-soğuk döngü yaşayan bölgelerde** etkilidir. Termografi, geniş yüzey alanlarında delaminasyonun hızlı bir şekilde tespit edilmesine olanak sağlar ve bakım ekipleri tarafından sıkça tercih edilir (Gholizadeh, 2016).

Radyografi ve Bilgisayarlı Tomografi (CT)

Radyografi; X-ray radyografi katman içi yoğunluk farklarını belirler. Delaminasyonlu bölgeler, düşük yoğunluk nedeniyle daha açık tonlarda görünür. Sandviç çekirdek yapılarında core-face ayrılmalarının tespitinde çok etkilidir. **Bilgisayarlı Tomografi (CT)**; Kompozit yapıların **üç boyutlu iç görüntüsünü** oluşturur. Delaminasyonun hacmi, derinliği, büyüme yönü yüksek çözünürlükle belirlenebilir. CT yöntemi laboratuvar ortamında daha yaygın olup, araştırma ve prototip incelemelerinde sıklıkla kullanılır (Katunin et al., 2015).

Shearography (Holografik İnterferometri)

Shearography, kompozit panel üzerine dış yük (vakum, ısı, titreşim) uygulanarak oluşan yüzey deformasyonlarını interferometri prensibiyle ölçer. Delaminasyon bölgeleri altındaki katman ayrılmaları yüzeyde **eş şekil değişimi anomalileri** oluşturur. Bu anomaliler interferometrik desenlerde belirgin olarak görülür. Shearography yöntemi çok hızlıdır, büyük yüzeyleri tarayabilir, gizli delaminasyonları BVID dahil tespit edebilir. Özellikle bakım hangarlarında geniş kompozit yüzeylerin denetiminde tercih edilir (Gholizadeh, 2016; Katunin et al., 2015).

Akustik Emisyon (AE) Teknikleri

Akustik emisyon yöntemi, malzeme üzerindeki mikro çatlakların ve delaminasyon ilerlemesinin oluşturduğu **yüksek frekanslı ses dalgalarını** algılar. Sensörler panel üzerine yerleştirilir. Mikro hasarın ilerlediği bölgeden yayılan akustik dalgalar sinyal olarak kaydedilir. Bu yöntem, özellikle; yük altında test, yapısal sağlık izleme uygulamalarında etkilidir. Akustik emisyon yöntemi hasarın **gerçek zamanlı takibine** olanak sağlar (Sierakowski, 2010).

Fiber Bragg Grating (FBG) Sensörler ile Yapısal Sağlık İzleme

FBG sensörleri, optik fiberler içine entegre edilen Bragg ızgaraları aracılığıyla deformasyonu ve sıcaklık değişimlerini ölçer. Delaminasyon bölgelerinde gerilme dağılımı değiştiğinden, FBG sensöründen dönen yansıyan ışığın dalga boyu kayar. FBG sensörleri hafiftir, elektromanyetik girişimden etkilenmez ve kanat ile gövde panellerine gömülü olarak yerleştirilebilir. Bu nedenle modern SHM (Structural Health Monitoring) sistemlerinin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Majumder, Gangopadhyay, Chakraborty, Dasgupta, & Bhattacharya, 2008).

Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC)

DIC, yüzey üzerindeki rastgele noktaların (speckle deseni) kamera ile kaydedilerek deformasyon ve gerinim alanlarının hesaplanmasına dayanır. Delaminasyonlu bölgelerde, yük altındaki deformasyon alanı **ani değişiklikler** gösterir. Yüzeyde “gerinim atlamaları” gözlenir. DIC yöntemi, temassızdır, yüksek çözünürlük sağlar, araştırma laboratuvarlarında sık kullanılır (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

Gelişmekte Olan NDT Yöntemleri

Delaminasyon tespitinde yeni yaklaşım ve teknolojiler de hızla gelişmektedir. Terahertz (THz) görüntüleme ile THz dalgaları CFRP içini tarayarak katman ayrılmalarını görünür hâle getirebilir (Zhang et al., 2016; Nsengiyumva, Zhang, & Zhou, 2023). Yapay zekâ destekli NDT uygulamalarında ise ultrason ve termografi verilerinin makine öğrenmesi veya derin öğrenme (ML/CNN) yöntemleriyle analizi yapılarak otomatik delaminasyon haritalaması gerçekleştirilebilmektedir (Huang, 2024). Lazer tarama vibrometrisi ile panel üzerindeki titreşim modları ölçülerek delaminasyon bölgesi belirlenebilir. Bu yöntemler henüz endüstriyel standartlaşma aşamasındadır; ancak gelecekte bakım robotları ve otonom denetim sistemleriyle bütünleşerek yaygınlaşması beklenmektedir (Gholizadeh, 2016; Katunin et al., 2015).

DELAMİNASYONUN MEKANİK ETKİLERİ

Delaminasyon, kompozit yapıların katmanlı doğası nedeniyle malzemenin mekanik davranışını doğrudan etkileyen en kritik hasar türlerinden biridir. Katmanlar arasındaki ayrılma, malzemenin yük taşıma mekanizmasını bozarak rijitliğin azalmasına, gerilme yoğunlaşmalarının artmasına ve özellikle basma yükleri altında burkulmaya karşı dayanımın düşmesine neden olur (Talreja & Singh, 2012). Havacılık sektöründe kullanılan CFRP yapılar lif yönüne bağlı yüksek çekme dayanımı sağlarken, interlaminar bağ mukavemeti reçine tarafından kontrol edilir; bu nedenle delaminasyonun varlığı yapısal emniyet açısından önemli bir zayıflık oluşturur (Huang & Bobyr, 2023; Chang, 2012).

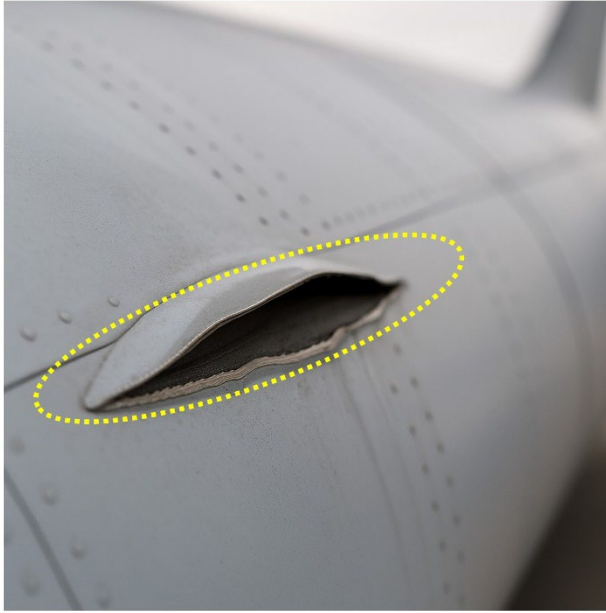
Rijitlik Kaybı ve Yük Taşıma Kapasitesindeki Azalma

Delaminasyon, kompozit laminatın global rijitliğini azaltarak yüklerin katmanlar arasında homojen şekilde dağılmasını engeller. Katman ayrılması sonucunda, yük taşımada görevli fiber grupları devre dışı kalır ve malzeme lokal olarak daha düşük elastik modülle davranmaya başlar. Bu durum özellikle kanat kutusu, gövde panelleri ve flap bağlantılarında önemli rijitlik kayıplarına neden olur. Literatürde delaminasyonun laminat bükülme rijitliğini %20–60 arasında azaltabileceği rapor edilmiştir (Talreja & Singh, 2012; Huang & Bobyr, 2023). Rijitlik azalması, kompozit yapının doğal frekanslarını da etkileyerek aeroelastik davranışta değişimlere yol açabilir. Kanat gibi aerodinamik yük taşıyan yapılarda bu durum flutter sınırının düşmesine ve uçuş

sırasında istenmeyen titreşim modlarının ortaya çıkmasına neden olabilir (Talreja & Singh, 2012).

Gerilme Yoğunlaşmaları ve Mikrohasarın İlerleyişi

Delaminasyon bölgesi etrafında kesme gerilmeleri ve normal gerilmeler önemli ölçüde artar. Bu gerilme yoğunlaşmaları, kompozit yapının mikrohasar mekanizmalarını tetikler ve ilerleyen süreçte matris çatlaklarının büyümesine, fiber-matris ara yüz zayıflamasına ve ilave delaminasyon bölgelerinin oluşmasına neden olur (Talreja & Singh, 2012). Bu nedenle delaminasyon, kompozit yapılarda çoğu zaman zincirleme bir hasar sürecinin başlangıcı olarak değerlendirilir (Kreculj & Rašuo, 2011). Uçak gövdesi gibi geniş kompozit panellerde bu etki, uzun süreli titreşim yükleri altında daha belirgin hâle gelir.

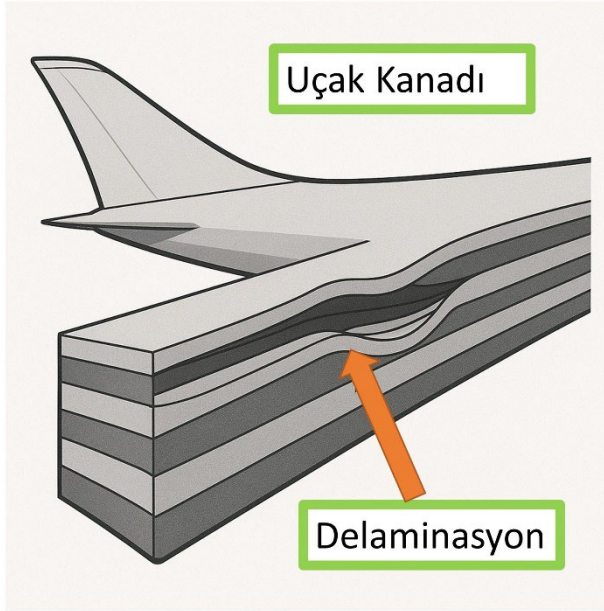


Şekil 4. Uçak gövdesinde meydana gelmiş bir delaminasyon

Bükülme ve Burkulma Dayanımındaki Azalma

Basma yükleri altında delaminasyonun etkisi en kritik seviyeye ulaşır. Katmanlar arasındaki ayrılma, panelin burkulma modlarını değiştirerek daha

düşük kritik yüklerde burkulmasına neden olur. Delaminasyon nedeniyle laminatın efektif kalınlığı azalır, katmanlar arasında kesme aktarımı bozulur ve yerel burkulma daha erken oluşur. Tek bir delaminasyon bölgesi bile laminatın basma dayanımını %15–40 arasında azaltabilir (Kreculj & Rašuo, 2011; Francesconi et al., 2023). Bu durum özellikle uçak kanatlarında, gövde panellerinde ve stringer–skin birleşim bölgelerinde büyük bir risk oluşturur.



Şekil 5. Uçak kanadında görülen delaminasyon

CAI (Compression After Impact) Dayanımının Düşmesi

Darbe sonrası kompozitlerde görülen en kritik davranışlardan biri CAI dayanımındaki azalmadır. BVID türü hasarlar görünür olmayabilir ancak içten içe ciddi delaminasyon gelişimine neden olur. CAI dayanımı, kompozit yapının uçuş sırasında yük altında güvenle görev yapabilmesi için en önemli performans göstergelerinden biridir (Chang, 2012; Francesconi et al., 2023). Darbeli bölgelerde fiberler kırılır, matris çatlar, ara yüz ayrılır; bu da delaminasyon büyümesine yol açar. Bu nedenle uçak üreticileri CAI dayanımını artırmak için toklaştırılmış reçine sistemleri, Z-pin takviyesi ve

hibrit lay-up tasarımları gibi çeşitli yöntemler kullanmaktadır (Tong, Mouritz, & Bannister, 2002; Mouritz, 2013; Francesconi et al., 2023).

Aeroelastik Davranışa Etkisi

Delaminasyonun aeroelastik davranışa etkisi özellikle kompozit kanat yapılarında önem taşır. Delaminasyon, kanat panelinin doğal frekanslarını düşürür, titreşim modlarını değiştirir ve akış kaynaklı yüklerle etkileşimini değiştirir. Bu durum flutter sınırının düşmesine ve bazı uçuş koşullarında aeroelastik kararsızlıkların ortaya çıkmasına neden olabilir. Literatürde delaminasyonun kanat yapılarında flutter hızını %8–20 oranında azaltabileceği rapor edilmiştir (Talreja & Singh, 2012).

Yük Aktarım Mekanizmasının Bozulması

Kompozit yapılarda yük aktarımı esas olarak fiberler boyunca gerçekleşir; ancak delaminasyon varlığında katmanlar arasında kesme transferi ortadan kalkar. Bu durum, yükün yeniden dağıtılmasına, belirli fiber gruplarına aşırı yük binmesine ve yorgunluk hasarının hızlanmasına neden olur. Özellikle uçak gövde panellerinde delaminasyonun ilerleyişi, yorgunluk ömrünü ciddi şekilde azaltmaktadır (Chang, 2012; Talreja & Singh, 2012).

HASAR TOLERANSI TASARIMI VE DELAMİNASYONUN ÖNLENMESİ

Uçak yapılarında kullanılan kompozit malzemelerin güvenilirliği, sadece yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi temel avantajlarla değil, aynı zamanda hasar toleransı kavramı ile değerlendirilmektedir. Delaminasyonun çoğu zaman gizli biçimde ilerlemesi, özellikle havacılık uygulamalarında güvenlik açısından kritik bir zorluk oluşturmaktadır (Kreculj & Rašuo, 2011; Talreja & Singh, 2012). Bu nedenle hem malzeme tasarımında hem de üretim süreçlerinde delaminasyon riskini azaltmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir.

Laminat Dizaynı ve Fiber Yönelim Optimizasyonu

Kompozit laminatların fiber yönelimleri, yük aktarımı ve hasar ilerleyişi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Katmanların 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° yönlerinde uygun oranlarda yerleştirilmesi, interlaminar kayma ve açılma gerilmelerinin

kontrol edilmesine yardımcı olur (Baker et al., 2004; Soutis, 2005). Delaminasyonu azaltmak için yaygın tasarım yaklaşımları arasında $\pm 45^\circ$ katmanlarının artırılması, kayma gerilmelerine karşı direncin yükseltilmesi, sırasız (quasi-isotropic) dizilimler ile gerilmelerin daha homojen dağılması ve stringer-skin birleşimleri, delik çevreleri, perçin hatları gibi kritik alanlarda yerel güçlendirme yapılması sayılabilir. Uygun fiber yönelim kombinasyonları, özellikle kanat kutusu ve flap bağlantılarında delaminasyon riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Baker et al., 2004).

Toughened Resin Sistemleri (Toklaştırılmış Reçineler)

Epoksi esaslı matrislerin kırılgan doğası, delaminasyonun ana sebeplerinden biridir. Bu nedenle modern uçak yapılarında “toughened resin” olarak adlandırılan yüksek tokluk değerlerine sahip reçine sistemleri kullanılmaktadır (Talreja & Singh, 2012; Quan & Ivankovic, 2015). Bu toklaştırıcılar kauçuk partikülleri, termoplastik fazlı modifikasyonlar veya nano katkılar (örneğin CNT, grafen) şeklinde olabilir. Toughened resin sistemleri sayesinde ara yüz bağ dayanımı artar, mikro çatlak ilerleyişi gecikir ve darbe sonrası CAI dayanımı belirgin şekilde yükselir.

3B Güçlendirilmiş Kompozitler (Z-Pinning, Stitching, Tufting)

Laminatların sadece iki boyutlu (2D) fiber yerleşimine sahip olması, interlaminar dayanımın sınırlı kalmasına neden olur. Bu nedenle 3B güçlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Z-pinning yaklaşımında katmanlara dik doğrultuda yerleştirilen ince pinler, delaminasyonu fiziksel olarak engeller ve enerji yutma kapasitesini artırır (Tong et al., 2002; Mouritz, 2013). Z-pin uygulamalarında CAI dayanımında %30’a kadar artış bildirilmiştir (Francesconi et al., 2023). Stitching yönteminde ise katmanlar dikiş benzeri işlemlerle birbirine bağlanarak darbe sonrası ayrılma azaltılır. Tufting tekniğinde uzun fiberler laminat boyunca dikey olarak yerleştirilerek 3B bir takviye elde edilir. Bu teknikler, yük altında delaminasyonun yayılmasını engelleyen mekanik bariyerler oluşturmaktadır.

Nano Takviyeli Kompozit Sistemleri

Son yıllarda nanoteknoloji, delaminasyonun azaltılmasına yönelik önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kullanılan nano katkılar:

- Karbon nanotüpler (CNT),
- Grafen nanoplateletler,
- Nano kil,
- Silika nanopartiküller.

Bu katkılar, fiber–matris ara yüzünü güçlendirerek çatlak ilerleyişini zorlaştırır, ara yüz kaymasını sınırlar, düşük enerjili darbelerde hasar büyümesini azaltır (Quan et al., 2020; Huang & Bobyr, 2023). Grafen katkılı epoksi reçinelerin interlaminar kayma dayanımında %20–35 artış sağladığına dair çalışmalar bulunmaktadır (Quan et al., 2020).

Sandwich Yapı Tasarımında Hasar Toleransı

Sandviç kompozit yapılar, hafiflik ve rijitlik avantajları nedeniyle uçak gövde panellerinde yaygın olarak kullanılır. Ancak core–face ara yüzü delaminasyona oldukça hassastır. Delaminasyonu azaltmak için yüksek yapışma dayanımlı reçinelerin kullanılması, hücre duvarı kalınlığının optimize edilmesi ve core malzemesine (Nomex, PMI, PVC) uygun yüzey işlemlerinin uygulanması önerilmektedir (Baker et al., 2004). Sandviç panellerde kenar bölgeleri ve bağlantı noktaları, özel olarak güçlendirilmesi gereken kritik alanlardır.

Üretim Süreçlerinin İyileştirilmesi

Delaminasyonun önlenmesinde en kritik adımlardan biri üretim sürecidir. Otoklav basınç–sıcaklık optimizasyonu, reçine akış simülasyonları, vakum torbalama kalitesinin artırılması, otomatik fiber yerleştirme (AFP/ATL), reçine transfer kalıplama (RTM) ve out-of-autoclave (OOA) gibi gelişmiş üretim teknolojilerinin kullanılması, üretim kaynaklı delaminasyon oranını belirgin şekilde düşürmektedir (Baker et al., 2004; Marsh, 2015). Nem kontrolü, kalıp yüzey hazırlığının iyileştirilmesi ve sensör tabanlı proses izleme uygulamaları da boşluk oluşumu, reçine eksikliği veya katman kayması gibi kusurların minimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

MODERN UÇAKLARDA DELAMİNASYON ÖRNEKLERİ

Kompozit malzemelerin havacılık sektöründe kullanım oranının artmasıyla birlikte delaminasyon, modern uçak tasarım ve bakım süreçlerinde kritik bir değerlendirme parametresi hâline gelmiştir. Özellikle CFRP’nin gövde ve kanat yapılarında yüksek oranda kullanıldığı yeni nesil uçaklarda,

delaminasyon hem üretim sürecinde hem de uçuş sırasında karşılaşılan önemli bir yapısal risk olarak ele alınmaktadır (Marsh, 2015; Tiwari & Jha, 2013). Bu bölümde Boeing 787 Dreamliner, Airbus A350 XWB ve diğer bölgesel/savunma platformlarından bilinen delaminasyon örnekleri literatür ve teknik raporlar ışığında özetlenmektedir.

Boeing 787 Dreamliner Yapılarında Delaminasyon Problemleri

Boeing 787, yaklaşık %50 oranında kompozit malzeme kullanımına sahip olmasıyla modern havacılıkta bir dönüm noktasıdır. Gövde panellerinin büyük bir kısmı tek parça CFRP barellerden üretilmiştir (Marsh, 2015; Tiwari & Jha, 2013). Bu geniş kompozit yüzey alanı, delaminasyon riskinin kontrol edilmesini kritik hâle getirmiştir. **Üretim kaynaklı delaminasyon örnekleri;** Boeing 787 üretiminin ilk yıllarında bazı gövde bölümlerinde; **lay-up sırasındaki fiber kaymaları, otonom yerleştirme (AFP) hataları, otoklav basınç-sıcaklık tutarsızlıkları** nedeniyle lokal delaminasyon bölgeleri tespit edilmiştir. Bu durum, operasyona alınmadan önce birçok gövde parçasının yeniden işlenmesini veya tamir edilmesini gerektirmiştir.

Yıldırım çarpması sonrası delaminasyon; 787 gövdesi, karbon fiberin düşük elektrik iletkenliğini telafi etmek amacıyla bakır mesh ile kaplanmıştır. Bununla birlikte bazı denemelerde yıldırımın lokal olarak reçine yanmasına, core-skin ara yüzünde ayrılmaya ve delaminasyon başlangıcına neden olabildiği raporlanmıştır (Zhang et al., 2016).

BVID kaynaklı delaminasyon; Boeing bakım bültenlerinde apron ekipmanlarının düşük enerjili darbeleri sonrasında delaminasyon oluşumunun sık karşılaşılan bir olay olduğu belirtilmektedir. Darbe yüzeyde iz bırakmazken, ultrasonik C-Scan kontrollerinde geniş delaminasyon halkaları gözlemlenmiştir (Katunin et al., 2015).

Airbus A350 XWB Uçaklarında Delaminasyon Olayları

Airbus A350, tıpkı 787 gibi yüksek oranda kompozit kullanımına sahip olup gövdesinin yaklaşık %53'ü CFRP'den oluşmaktadır (AZoM, 2012). Kanat yapıları tam otomatik fiber yerleştirme (AFP) teknolojisi ile üretilmektedir.

Kanat kökü delaminasyon bulguları; Airbus bakım dokümanlarında, A350'nin kanat kökünde yer alan yüksek gerilme bölgelerinde interlaminar

gerilme birikimi, core–face ayrılması ve yerel delaminasyon durumlarının servis sırasında tespit edildiği belirtilmektedir (AZoM, 2012; Thankachen, 2018).

Nem ve termal döngülerin etkisi; A350’nin operasyonel profili gereği sık tekrarlayan sıcaklık değişimleri, fiber–matris ara yüzünde hidrotermal bozulma, reçine yumuşaması ve mikro çatlak büyümesi oluşturarak delaminasyon ilerlemesini hızlandırabilmektedir (Thankachen, 2018; Talreja & Singh, 2012).

Ağırlık azaltma amaçlı sandviç panellerde ayrılmalar; Airbus, gövdede geniş sandviç kompozit paneller kullanmaktadır. Bazı bölgelerde face sheet–core ara yüzünde yapışma zayıflığı ve darbe sonrası ayrılmalar tutarlı olarak rapor edilmiştir. Bu tür hasarlar çoğunlukla termografi ve ultrasonik C-Scan ile tespit edilmektedir (Katunin et al., 2015; Baker et al., 2004).

Bölgesel Jetler ve Helikopterlerde Delaminasyon Durumları

Bölgesel jetlerde kompozit kullanımı genişlemekte olup özellikle dikey stabilize, yatay stabilize, radome ve kapak bölgelerinde delaminasyon bakım sırasında en sık tespit edilen kusurlardan biridir. Düşük açılı darbeler ve kuş çarpmaları, BVID tipi hasarların oluşmasına neden olmaktadır (Kreculj & Rašuo, 2011; Katunin et al., 2015). Bu tip hasarlar genellikle yüzeyde iz bırakmadıkları için NDT taramaları zorunludur. Helikopter rotor palaları, yüksek frekanslı dinamik yükler altında çalıştığından delaminasyon için kritik bölgelerden biridir; tipik delaminasyon bölgeleri leading edge koruma kaplamaları altında, spar–skin birleşim noktasında ve honeycomb core kenarlarında görülür (Baker et al., 2004). Bu hasarlar çoğunlukla shearography veya ultrasonik C-Scan ile tespit edilir (Katunin et al., 2015).

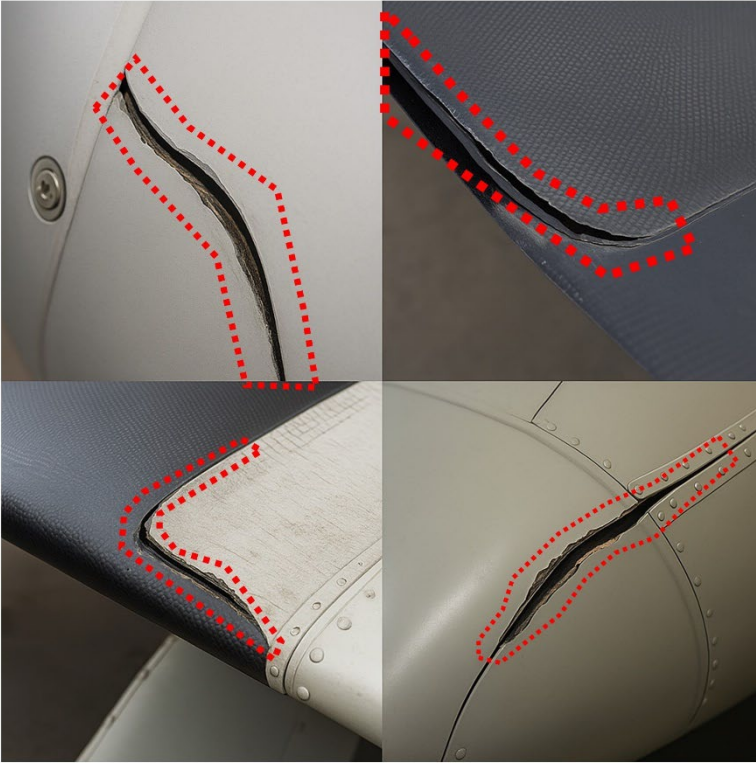
Savunma ve Uzay Platformlarında Delaminasyon

F-22, F-35 gibi modern savaş uçakları ile uzay araçlarında CFRP kullanımı oldukça yüksektir. Bu platformlarda delaminasyon örnekleri; yüksek sıcaklık bölgelerinde reçine yanması, yakıt buharına maruz kalan tank kaplamalarında ayrılmalar, akış kaynaklı sürtünme ısısı nedeniyle katman açılması ve yüksek G manevralarında oluşan tekrarlı yük etkileri şeklinde bildirilmektedir (Chang, 2012; Sierakowski, 2010). Özellikle süpersonik platformlarda akıştan kaynaklı

termomekanik yüklemeler, delaminasyonun hızla ilerlemesine neden olabilmektedir.

Sandviç Panellerde Delaminasyon Örnekleri

Nomex, PMI ve karbon fiber yüzeyli sandviç yapılarda delaminasyon çoğunlukla core-face ayrılması, yapışma hatası, su/nem emilimi sonrası şişme ve kuvvetli termal döngüler ile ortaya çıkar (Baker et al., 2004). Bu tür hasarlar Airbus A320/321 gövde panelleri ve Boeing'in bazı bölgesel gövde kapaklarında sıklıkla raporlanmıştır (Marsh, 2015; Katunin et al., 2015).



Şekil 6. Kompozit uçak yüzeylerinde karşılaşılan tipik delaminasyon hasarlarını temsil eden örnek görüntüler. Farklı panel kenarları, fairing geçiş bölgeleri ve kompozit-metal bağlantılarında meydana gelebilen delaminasyon türleri

GELECEK PERSPEKTİFLERİ VE SONUÇ

Kompozit malzemelerin havacılık sektöründeki kullanım oranı her geçen yıl artmakta olup, buna paralel olarak delaminasyonun tespiti, modellenmesi ve önlenmesine yönelik araştırmalar da hız kazanmaktadır (Huang & Bobyr, 2023; Talreja & Singh, 2012). Yeni nesil uçaklarda kompozit oranının %50'nin üzerine çıkması, bu yapıların delaminasyon karşısındaki davranışının daha iyi anlaşılmasını ve tespit yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir (Marsh, 2015; AZoM, 2012).

Gelişmiş Malzemeler ve Yapısal Güçlendirme Yaklaşımları

Gelecekte delaminasyon probleminin azaltılmasına yönelik en önemli gelişmeler, ileri malzeme mühendisliği ve 3B güçlendirme yöntemleri üzerinden şekillenecektir. Nano-mühendislik yaklaşımıyla geliştirilen karbon nanotüp (CNT), grafen nanoplateletleri ve diğer 2D nanomalzemeler, fiber-matris ara yüzünü güçlendirerek çatlak ilerleyişini önemli ölçüde yavaşlatmaktadır (Quan et al., 2020; Huang & Bobyr, 2023). Bu nanokatkıların interlaminar kayma dayanımında ve CAI performansında belirgin artış sağladığı bilinmektedir. Aynı şekilde Z-pinning, stitching ve tufting gibi üç boyutlu (3B) takviye teknikleri, katmanları dik doğrultuda güçlendirerek delaminasyon yayılımını fiziksel olarak engellemekte ve darbe dayanımını artırmaktadır (Tong et al., 2002; Mouritz, 2013; Francesconi et al., 2023). Gelecekte büyük gövde panelleri, askeri platformlar ve yüksek yük taşıyan bölgelerde bu hibrit malzeme tasarımlarının daha yaygın kullanılması beklenmektedir.

Akıllı Yapılar, Sensör Entegrasyonu ve Yapay Zekâ Destekli Tespit Teknolojileri

Kompozit yapılarda sensörlerin doğrudan malzemeye gömülmesi, delaminasyon tespitinde önemli bir paradigma değişimi olarak değerlendirilmektedir. Fiber Bragg Grating (FBG) sensörler, gömülü piezoelektrik tabakalar ve mikro-optik bileşenler sayesinde delaminasyonun erken aşamada tespit edilmesi ve yapısal davranışın gerçek zamanlı izlenmesi mümkün olmaktadır (Majumder et al., 2008). Bu “akıllı malzeme” yaklaşımı, gelecekte uçak panellerinin kendi hasarını algılayabilmesini sağlayacaktır.

Bunun yanında, NDT taramalarında elde edilen yüksek hacimli verilerin yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleri ile analiz edilmesi, hasar sınıflandırma ve otomatik bölütleme gibi işlemleri önemli ölçüde hızlandıracaktır (Huang, 2024). Termografi, ultrason ve vibrasyon tabanlı yöntemlerde derin öğrenme modellerinin kullanılmasıyla, bakım robotları ve otonom denetim sistemleri üzerinden tam otomatik delaminasyon tespiti mümkün hâle gelecektir (Gholizadeh, 2016; Katunin et al., 2015).

Veri Odaklı Yapısal Modellemede Dijital İkiz ve Gelişmiş Üretim Süreçleri

Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojisi, uçak yapılarının gerçek zamanlı yük geçmişinin, sıcaklık değişimlerinin ve çevresel koşulların sanal ortama aktarılmasını mümkün kılarak delaminasyonun başlangıcı ve ilerleyişi hakkında daha doğru öngörüler sağlamaktadır (Teixeira et al., 2021). Bu yaklaşım, bakım sürelerinin azaltılması, gereksiz parça değişimlerinin önlenmesi ve yapısal emniyetin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Üretim tarafında ise otomatik fiber yerleştirme (AFP/ATL), reçine transfer kalıplama (RTM) ve out-of-autoclave (OOA) tekniklerinin gelişmesi, üretim kaynaklı delaminasyonun azaltılmasına yardımcı olacaktır (Baker et al., 2004; Marsh, 2015). Reçine akış simülasyonları, sensör tabanlı kalite kontrol sistemleri ve gerçek zamanlı proses izleme uygulamalarının yaygınlaşmasıyla boşluk oluşumu, reçine eksikliği veya katman kayması gibi kusurların minimize edilmesi beklenmektedir.

SONUÇ

Bu bölümde kompozit uçak yapılarında delaminasyonun mekanizmaları, tespit yöntemleri, mekanik etkileri ve modern platformlardaki örnekleri literatür temelli olarak ortaya konmuştur. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi özellikleri sayesinde havacılık sektöründe vazgeçilmez hâle gelmiştir; ancak delaminasyon, bu malzemelerin en zayıf noktalarından biri olarak dikkat çekmektedir (Baker et al., 2004; Talreja & Singh, 2012; Huang & Bobyr, 2023). Modern NDT yöntemleri, SHM sistemleri ve nano-mühendislik tabanlı malzeme geliştirme çalışmaları sayesinde delaminasyonun tespiti ve kontrolü konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Gholizadeh, 2016; Majumder et al., 2008; Huang, 2024). Gelecekte kompozit uçak yapılarının daha güvenli, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlü hâle gelmesi için delaminasyon davranışının çok disiplinli yaklaşımlarla daha derinlemesine incelenmeye

devam edeceği öngörülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, kompozit uçak yapılarında delaminasyon hâlâ çözülmesi gereken önemli bir problem olsa da malzeme bilimi, sensör teknolojileri, dijital modelleme ve üretim mühendisliği alanındaki gelişmeler bu sorunun etkilerini azaltacak güçlü araçlar sunmaktadır (Teixeira et al., 2021; Tong et al., 2002; Quan et al., 2020). Gelecek çalışmaların çok disiplinli yaklaşımlarla delaminasyonun hem tespiti hem de önlenmesine yönelik çözümleri daha da geliştirmesi beklenmektedir. Bu bağlamda hem akademik araştırmaların hem de endüstriyel uygulamaların delaminasyon problemini azaltmaya yönelik yenilikçi yöntemler geliştirmesi, havacılık mühendisliğinin geleceği açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- AZoM. (2012). *The A350 XWB – Advanced materials and design*. AZoM.
- Baker, A. A., Dutton, S., & Kelly, D. (2004). *Composite materials for aircraft structures* (2nd ed.). Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Chang, J. B. (2012). *Composite structures damage tolerance analysis methods and guidelines* (NASA/CR-2012-217347). Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.
- Danacı, I. (2023). Use of polymer matrix composite materials in aviation applications. *Current Topics in Aeronautics*, 93.
- Francesconi, L., Loi, G., & Aymerich, F. (2023). Impact and compression-after-impact performance of a thin z-pinned composite laminate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32, 3923–3937.
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50–57.
- Huang, T., & Bobyr, M. (2023). A review of delamination damage of composite materials. *Journal of Composites Science*, 7(11), 468.
- Huang, X. (2024). A review of AI-based nondestructive testing of composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*. Advance online publication.
- Katunin, A., Dragan, K., & Dziendzikowski, M. (2015). Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 127, 1–9.
- Kreculj, D., & Rašuo, B. (2011). Review of impact damages in aircraft structures from the aspect of damage tolerance. *Tehnički Vjesnik*, 18(1), 123–134.
- Kul, M., Danacı, I., Gezer, & Karaca, B. (2020). Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel. *Materials Letters*, 279, 128510. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128510>
- Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150–164.
- Marsh, G. (2015). Composites in commercial jets. *Reinforced Plastics*, 59(6), 217–221.
- Mouritz, A. P. (2013). Delamination properties of z-pinned composites in hot-wet environments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, 134–142.
- Nsengiyumva, W., Zhang, J., & Zhou, Y. (2023). Terahertz spectroscopic characterization and thickness measurement of multilayer composites. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(4), 493–508.

- Quan, D., & Ivankovic, A. (2015). Toughening of epoxy adhesives with micro and nano particles: A review. *Journal of Adhesion*, 91(5), 331–364.
- Quan, D., et al. (2020). Fracture behaviour of carbon fibre/epoxy composites interleaved by MWCNT and graphene nanoplatelet-doped thermoplastic veils. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- Sierakowski, R. L. (2010). Aircraft damage tolerance. In *Proceedings of the 16th International Conference on Composite Structures*.
- Soutis, C. (2005). Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(2), 143–151.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. New York, NY: Springer.
- Talreja, R., & Singh, C. V. (2012). *Damage and failure of composite materials*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Teixeira, R., et al. (2021). Digital twins of composite aerostructures towards structural health monitoring. In *Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring*.
- Thankachen, C. V. (2018). *Impact damage analysis of aircraft composite structures at low velocity* (Master's thesis). Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.
- Tiwari, G., & Jha, S. K. (2013). The composite materials revolution in the Boeing 787 Dreamliner: A review. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials*.
- Tong, L., Mouritz, A. P., & Bannister, M. K. (2002). *3D fibre reinforced polymer composites*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Zhang, J., Li, W., Cui, H., Shi, C., Han, X., Ma, Y., ... Zhou, Y. (2016). Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer composites using reflective terahertz imaging. *Sensors*, 16(6), 875.

BÖLÜM 3

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN HAVACILIK UYGULAMALARINDA KULLANIMI

Arş. Gör. İlhan DANACI ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146332>

¹ Department of Aeronautical Engineering, Sivas University of Science and Technology, Sivas, Türkiye, idanaci@sivas.edu.tr , Orcid ID: 0000-0002-9148-1481.

GİRİŞ

Havacılık ve uzay endüstrisi, malzeme bilimi ve mühendisliğinde geliştirilen ileri teknolojilerin en hızlı şekilde uygulamaya aktarıldığı sektörlerin başında gelmektedir. Uçak ve uzay araçlarında kullanılan yapısal ve fonksiyonel malzemeler; düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, yorulma direnci, termal kararlılık, oksidasyon ve korozyon direnci gibi çok sayıda gereksinimi aynı anda karşılamak zorundadır. Ayrıca bu gereksinimler, operasyonel güvenlik, sertifikasyon standartları ve uzun hizmet ömrü gibi kısıtlarla birlikte değerlendirilmelidir (Campbell, 2010; Cantor et al., 2004).

Geleneksel olarak havacılık uygulamalarında alüminyum, titanyum ve nikel esaslı alaşımlar yaygın şekilde kullanılmıştır. Ancak artan performans beklentileri, yakıt verimliliği hedefleri ve emisyon kısıtları, bu alaşımların sınırlarını ortaya koymuştur. Özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan motor bileşenleri ve titreşim yüklerine maruz kalan yapısal elemanlar için daha ileri malzeme çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Pollock & Tin, 2006; Leyens & Peters, 2003).

Bu bağlamda metal matrisli kompozit malzemeler (Metal Matrix Composites, MMC), metal matrisin süneklik ve tokluk avantajlarını; seramik veya karbon esaslı takviyelerin yüksek rijitlik ve termal dayanım özellikleriyle birleştiren hibrit bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. MMC'ler, monolitik metallere kıyasla daha yüksek elastik modül, daha iyi aşınma ve sürünme direnci ve kontrol edilebilir termal genleşme katsayısı sunabilmektedir (Miracle, 2005; Chawla & Chawla, 2013; Surappa, 2003).

Havacılık sektöründe MMC'lere yönelik ilgi özellikle 1980'li yıllardan itibaren artmış; NASA ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) gibi kurumlar tarafından desteklenen projeler kapsamında Al-SiC, Ti-SiC ve Ni esaslı MMC sistemleri kapsamlı biçimde araştırılmıştır (Taya & Arsenault, 1989; Kainer, 2006). Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri, işlenebilirlik problemleri ve sertifikasyon zorlukları nedeniyle MMC'lerin ticarileşmesi sınırlı kalmıştır. Günümüzde ise eklemeli imalat, nano-takviyeler ve fonksiyonel derecelendirilmiş yapılar gibi yeni yaklaşımlar sayesinde MMC'ler yeniden havacılık araştırmalarının odağına girmiştir (Torralba et al., 2014; Miracle & Senkov, 2017).

Bu kitap bölümünde metal matrisli kompozit malzemelerin temel prensipleri, üretim yöntemleri, mekanik ve termal özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmakta; havacılık uygulamalarına yönelik özel vaka çalışmaları ve literatür karşılaştırmaları sunulmaktadır. Ayrıca, MMC'lerin havacılık endüstrisindeki avantajları, sınırlamaları ve gelecekteki araştırma yönelimleri kapsamlı bir perspektifle tartışılmaktadır.

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TEMEL YAPISI VE SINIFLANDIRILMASI

Metal matrisli kompozitler (MMC), mikroyapısal olarak tasarlanabilir olmaları sayesinde havacılık uygulamalarında büyük bir esneklik sunmaktadır. Bu malzemelerde temel amaç, metal matrisin süneklik, tokluk ve şekillendirilebilirlik özelliklerini korurken, takviye fazı aracılığıyla rijitlik, dayanım ve yüksek sıcaklık performansını artırmaktır. MMC'ler bu yönüyle klasik alaşımlar ile seramik matrisli kompozitler arasında köprü oluşturan bir malzeme sınıfı olarak değerlendirilmektedir (Miracle, 2005; Chawla & Chawla, 2013).

MMC'ler genel olarak matris malzemesine, takviye türüne ve takviye geometrisine göre sınıflandırılmaktadır. Havacılık uygulamalarında en yaygın sınıflandırma, matris esaslı yaklaşımdır.

Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırma

Alüminyum esaslı MMC'ler, düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları ve iyi termal iletkenlikleri nedeniyle uçak gövdesi panelleri, yapısal bağlantı elemanları ve fren sistemlerinde öne çıkmaktadır. Özellikle Al-SiC ve Al-Al₂O₃ sistemleri, rijitlik artışı ve termal genleşmenin kontrolü açısından yoğun şekilde araştırılmıştır (Taya & Arsenault, 1989; Surappa, 2003; Lloyd, 1994).

Titanyum matrisli kompozitler (TMC), yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci gerektiren motor bileşenleri için kritik öneme sahiptir. Ti-SiC sistemleri, türbin diskleri ve kompresör bileşenleri gibi yüksek yük taşıyan parçalarda potansiyel uygulamalar sunmaktadır (Froes, 2015; Leyens & Peters, 2003).

Nikel esaslı MMC'ler ise süperalaşım temelli motor bileşenlerinde, özellikle sürünme direnci ve termal stabilitenin kritik olduğu bölgelerde kullanılmaktadır (Pollock & Tin, 2006; Miracle & Senkov, 2017).

Takviye Türüne Göre Sınıflandırma

Takviye fazı; partikül, kısa lif, sürekli lif veya whisker formunda olabilir. Partikül takviyeli MMC'ler izotropik mekanik özellikler ve daha düşük üretim maliyetleri sunarken, sürekli lif takviyeli sistemler yönlü dayanımın kritik olduğu havacılık bileşenlerinde tercih edilmektedir (Kelly & Zweben, 2000; Chawla, 2012).

Silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve karbon esaslı takviyeler havacılık uygulamalarında en sık kullanılan malzemelerdir. Bu takviyeler, elastik modül artışı, aşınma direnci ve termal genleşme katsayısının düşürülmesi gibi avantajlar sağlamaktadır (Kainer, 2006; Torralba et al., 2014).

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MMClerin üretimi, matris ve takviye fazları arasındaki arayüz bağının kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. Havacılık uygulamalarında kullanılan MMC'lerde mikroyapı homojenliği, porozite kontrolü ve takviye-matris reaksiyonlarının minimize edilmesi temel hedeflerdir.

Karıştırmalı döküm yöntemi, özellikle Al esaslı MMC'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde takviye partikülleri ergimiş metal içerisine mekanik olarak karıştırılarak dağıtılır. Düşük maliyetli olmasına rağmen, partikül aglomerasyonu ve ıslanabilirlik problemleri önemli dezavantajlar oluşturmaktadır (Hashim et al., 1999; Rohatgi, 1993).

Basınçlı infiltrasyon yöntemleri ise karmaşık geometrili havacılık bileşenleri için daha kontrollü bir üretim süreci sunmaktadır. Bu yöntemler, yüksek hacimsel takviye oranlarının elde edilmesine olanak tanımaktadır (Mortensen & Llorca, 2010).

Toz metalurjisi tabanlı yöntemler, havacılık uygulamalarında yüksek performanslı MMC'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde homojen takviye dağılımı ve düşük porozite seviyeleri elde edilebilmektedir (German, 1996; Kainer, 2006).

Sıcak izostatik presleme (HIP) ve difüzyon bağlama yöntemleri, özellikle titanyum ve nikel matrisli MMC'lerde tercih edilmektedir. Bu yöntemler yüksek mekanik performans sağlasa da, üretim maliyetleri yüksektir (Froes, 2015; Miracle, 2005).

MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLER

Metal matrisli kompozitlerin havacılık uygulamalarındaki temel avantajı, özelliklerinin tasarlanabilir olmasıdır. Takviye türü ve hacim oranı değiştirilerek elastik modül, akma dayanımı, yorulma direnci ve termal genleşme katsayısı optimize edilebilmektedir.

MMC'ler, monolitik metallere kıyasla daha yüksek elastik modül ve özgül dayanım sunmaktadır. Özellikle Al-SiC sistemlerinde elastik modül %30–70 oranında artırılabilir (Taya & Arsenault, 1989; Surappa, 2003). Bu özellik, uçak yapılarında titreşim davranışının kontrolü açısından önemlidir.

Termal genleşme katsayısının düşürülmesi, havacılık uygulamalarında boyutsal kararlılık açısından kritik bir parametredir. MMC'ler, özellikle uydu ve motor bileşenlerinde termal çevrimlere karşı üstün performans göstermektedir (Clyne & Withers, 1993; Torralba et al., 2014).

Yorulma davranışı açısından MMC'ler, takviye-matris arayüz özelliklerine bağlı olarak farklı performanslar sergileyebilmektedir. Doğru arayüz mühendisliği ile yorulma ömründe belirgin artışlar elde edilebilmektedir (Suresh, 1998; Chawla, 2012).

HAVACILIK UYGULAMALARINDA MMC'LER

MMCler, havacılık sektöründe hem yapısal hem de fonksiyonel bileşenlerde kullanılmıştır. En erken uygulamalar, Al-SiC kompozitlerinin uzay yapılarında ve uydu platformlarında kullanımı ile başlamıştır.

Alüminyum matrisli kompozitler, uçak gövde panelleri, kirişler ve bağlantı elemanlarında ağırlık azaltımı ve rijitlik artışı sağlamaktadır. Bu sayede yakıt verimliliği artırılmakta ve emisyonlar azaltılmaktadır (Campbell, 2010; Cantor et al., 2004).

Titanyum ve nikel esaslı MMC'ler, jet motorlarının yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek sürünme direnci

ve termal kararlılık sayesinde motor verimliliğini artırmaktadır (Pollock & Tin, 2006; Froes, 2015).

MMCLer, aşınma direnci ve termal iletkenlik avantajları sayesinde uçak fren disklerinde ve iniş takımı bileşenlerinde de araştırılmıştır. Al-SiC kompozitleri bu alanda öne çıkan sistemlerdir (Kainer, 2006; Miracle, 2005).

Metal matrisli kompozitlerin havacılık uygulamalarındaki avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Metal Matrisli Kompozitlerin Havacılık Uygulamalarındaki Avantaj ve Dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek özgül dayanım ve rijitlik	Yüksek üretim maliyeti
İyi yüksek sıcaklık performansı	Zor işlenebilirlik
Düşük termal genleşme	Hasar toleransı sınırlamaları
Aşınma ve sürünme direnci	Arayüz reaksiyonları
Tasarlanabilir özellikler	Geri dönüşüm zorlukları

MMCLer, sundukları yüksek performansa rağmen maliyet ve üretim karmaşıklığı nedeniyle henüz sınırlı sayıda ticari havacılık uygulamasında kullanılmaktadır (Chawla & Chawla, 2013; Miracle, 2005; Campbell, 2010).

MMC’LERİN HAVACILIKTA ÖZEL VAKA ÇALIŞMALARI

Metal matrisli kompozitlerin havacılık sektöründeki kullanımı, çoğunlukla belirli kritik bileşenlerle sınırlı kalmıştır. Bunun temel nedeni, bu malzemelerin sunduğu performans avantajlarının yalnızca yüksek yük ve sıcaklık altında çalışan parçalarda anlamlı hale gelmesidir.

Alüminyum matrisli kompozitler, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek boyutsal kararlılık gereksinimi nedeniyle uydu yapılarında tercih edilmiştir. Al-SiC sistemleri, optik platformlar ve hassas yönlendirme sistemlerinde termal deformasyonların azaltılmasında kullanılmıştır (Clyne & Withers, 1993; Torralba et al., 2014).

Titanyum ve nikel esaslı MMC’ler, jet motorlarının yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinde araştırılmıştır. Ti-SiC kompozitleri, türbin diskleri ve

kompresör bileşenlerinde özgül dayanım artışı sağlamıştır. Bununla birlikte, lif-matris arayüz reaksiyonları ve oksidasyon sorunları uygulamayı sınırlandıran faktörler olmuştur (Froes, 2015; Pollock & Tin, 2006).

Al-SiC MMC'ler, yüksek aşınma direnci ve termal iletkenlikleri sayesinde uçak fren disklerinde test edilmiştir. Bu sistemler, çelik bazlı frenlere kıyasla ağırlık avantajı sunmasına rağmen, maliyet ve bakım gereksinimleri nedeniyle sınırlı kullanım alanı bulmuştur (Kainer, 2006; Miracle, 2005). Tablo 2 de havacılık uygulamalarında kullanılan metal matrisli kompozitlerin nerelerde kullanıldığı ve mekanik kazanımları detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2: Havacılık uygulamalarında kullanılan metal matrisli kompozitlere ait literatür karşılaştırması

Matris Türü	Takviye	Mekanik Kazanım	Uygulama Alanı (Havacılık)	Referans
Al (seri alaşımları)	SiC partikül (mikro)	Elastik modül/rijitlik ve aşınma direnci artışı; CTE düşüşü	Uydu yapıları, fren diskleri, boyutsal kararlılık parçaları	Surappa (2003); Kainer (2006)
Al (Al-alaşımları)	Al ₂ O ₃ partikül (mikro)	Rijitlik ve aşınma direnci artışı; yorulma davranışında iyileşme	Yapısal paneller, bağlantı elemanları	Lloyd (1994); Chawla & Chawla (2013)
Al	B ₄ C partikül	Yoğunluk düşüşü + sertlik artışı; termal genişlemenin kontrolü	Uzay ve hafifletilmiş yapısal alt bileşenler	Torralba et al. (2014)
Al	Nano-SiC / nano-seramikler	Akma/çekme dayanımı artışı; aşınma ve sönümleme özelliklerinde iyileşme	Çok işlevli hafif yapısal parçalar, titreşim sönümleme	Casati et al. (2014); Qadir et al. (2023)
Al	Nano-Al ₂ O ₃ / oksit nanoparçacık	Dayanım ve tribolojik performans artışı; yüksek sıcaklık stabilitesi	Motor çevresi ikincil parçalar, aşınma yüzeyleri	Casati et al. (2014); Qadir et al. (2023)
Al	CNT (nano)	Yük transferi + Orowan/çekirdeklenme ile dayanım artışı (dağılım ve arayüz bağlanması kritik)	Hafif yapılar, ısı yönetim ve yüksek özgül dayanım hedefli parçalar	Singla (2015); Tajzad et al. (2020)
Al	Grafen (GNP/GR) (nano)	Dayanım/rijitlik artışı; aşınma ve ısı iletkenlikte iyileşme (topaklanma kritik)	Hafif yapılar, sürtünme-aşınma bölgeleri, ısı yayılım parçaları	Sayed Pourmand & Asgharzadeh (2020); Lin et al. (2024)
Al	Hibrit (ör. SiC + grafit/GR/CNT)	Sinerjik: rijitlik + kendinden yağlama/triboloji iyileşmesi; hedefe yönelik tasarım	Fren/triboloji bileşenleri, yapısal + fonksiyonel karma parçalar	Bodunrin et al. (2015); Kumar et al. (2024)
Ti (TMC)	SiC sürekli lif	Yüksek sıcaklık dayanımı ve özgül mukavemet; sürtünme/termal yorulma direnci (arayüz reaksiyonları kısıtlı)	Kompresör/türbin diskleri, motor sıcak bölgeleri	Leyens & Peters (2003); Froes (2015)
Ni (süperalaşım)	Oksit/seramik (mikro/nano)	Sürtünme direnci ve termal stabilite; yüksek sıcaklık mekanik performans	Türbin ve sıcak kademeler (niş)	Pollock & Tin (2006)
Al (FGM)	Dereceli Al-Al ₂ O ₃ (FGM)	Gerilme yığılmalarının azaltılması; termal bariyer/CTE geçişi	Termal gradyanlı yapılar, uzay panelleri, ısı koruma konseptleri	Li et al. (2020); Yadav et al. (2024)
Al/Ti/Ni (AM tabanlı)	AM ile MMC/FGM (çok malzemeli)	Geometri + malzeme fonksiyonelliği; yerel takviye ile performans	Karmaşık geometri, yerel aşınma/ısı bölgeleri, hızlı prototipleme	Ostolaza et al. (2023); Yadav et al. (2024)

GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE GELECEK EĞİLİMLER

Metal matrisli kompozitlerde (MMC) güncel araştırmalar, yalnızca “daha yüksek mukavemet” arayışından ziyade havacılık bileşenlerine özgü çok-kriterli tasarıma odaklanmaktadır.

- Özgül dayanım/rijitlik ve ağırlık azaltma
- Yorulma ve hasar toleransı
- Yüksek sıcaklıkta sürünme/oksidasyon direnci
- Termal iletkenlik ve ısıl genleşme katsayısı (CTE) uyumu ile ısıl yönetim
- Korozyon ve çevresel dayanım
- Üretilirlik, bakım-onarım ve sertifikasyon gereklilikleri

Bu nedenle literatürde öne çıkan eğilimler, malzeme bileşimi kadar üretim sürecinin tekrarlanabilirliği ve yapı-özellik ilişkisini kestirebilen tasarım yaklaşımları etrafında yoğunlaşmaktadır (Miracle, 2005; Chawla & Chawla, 2013).

Havacılık uygulamalarında MMC'lerin yaygınlaşmasının önündeki klasik engellerden biri, karmaşık geometrilere takviye fazını homojen ve kontrollü biçimde yerleştirebilme ihtiyacıdır. Bu noktada **katmanlı imalat (AM)** süreçleri hem kompozisyonun lokal olarak ayarlanabilmesi hem de parça içi ısıl gerilme ve CTE uyumsuzluklarının “kademeli geçiş” ile azaltılabilmesi açısından kritik bir fırsat alanı oluşturur. Özellikle **fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FGM)**; yanma odası, nozul, ısı kalkanı, sıcak kesit bağlantıları gibi bölgelerde metal-seramik veya metal-metal geçişleriyle termal şok ve ara yüz çatlak riskini azaltmayı hedefler (Yadav et al., 2024). AM tabanlı çok-malzemeli üretimde, lazer toz yatak ergitme (L-PBF) gibi yöntemlerde katmanlar arası yeniden ergitme ile ara yüz karışımının ve geçiş bölgesinin iyileştirilebildiği; böylece adım-adım kompozisyon değişiminin daha “yumuşak” bir gradyana dönüştürülebildiği raporlanmıştır (Schmidt et al., 2023). Benzer şekilde, tel ark katmanlı imalat (WAAM) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yaklaşımları, büyük boyutlu havacılık parçalarında biriktirme hızının yüksek olması nedeniyle işlevsel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Ostolaza et al., 2023).

AM tabanlı FGM/MMC üretiminin pratikteki en kritik teknik başlıkları; porozite ve bağlanma hataları, ara yüz reaksiyonları (gevrek intermetalik oluşumu), rezidüel gerilmeler ve süreç penceresinin dar olmasıdır (Ostolaza et al., 2023; Yadav et al., 2024). Bu nedenle güncel çalışmalar; süreç izleme (melt-

pool takibi), kapalı çevrim kontrol, proses haritalama ve modelleme ile “tasarım–üretim–kalite” zincirini bütünleştirmeye yönelmektedir.

Nano-ölçekli takviyeler (CNT, grafen, nano-SiC, nano-TiC) ile oluşturulan **nano-MMC** sistemleri, düşük hacim oranlarında dahi belirgin pekleşme sağlayabildiği için havacılıkta “ağırlık cezalarını” sınırlayan bir yaklaşım olarak öne çıkar. Ancak nano takviyelerde temel problem, aglomerasyon ve ara yüz ıslanabilirliği/bağ dayanımıdır. Bu nedenle literatürde; yüzey fonksiyonelleştirme, ultrasonik karıştırma, toz metalurjisinde kontrollü öğütme ve AM ön-alaşımlama gibi yöntemlerle dağılımın iyileştirilmesi tartışılmaktadır (Lin et al., 2024). Grafen takviyeli Al-matris nanokompozitlerin mekanik ve fonksiyonel özelliklerine ilişkin güncel bir derleme, pekleşme mekanizmalarının (yük transferi, dislokasyon yoğunluğu artışı, tane incelmeleri) yanında, havacılık açısından kritik olan yorulma ve hasar başlatma davranışının da dağılım/arayüz kalitesiyle kuvvetle bağlı olduğunu vurgulamaktadır (Lin et al., 2024).

Benzer şekilde **hibrit MMC** yaklaşımı (örneğin SiC + CNT veya SiC + grafen), tek bir takviye tipinin sınırlamalarını dengeleyerek hem sertlik/aşınma direnci hem de elektrik-ısı iletkenlik gibi çoklu performans hedeflerini aynı parçaya entegre etmeyi amaçlar. Havacılık bağlamında hibrit MMC’ler; aktüatör kızakları, iniş takımı yatak bölgeleri, kompresör muhafaza iç yüzeyleri ve aviyonik ısı yayılım bileşenleri gibi “mekanik + fonksiyonel” taleplerin birlikte bulunduğu parçalarda özellikle cazip bir tasarım uzayı sunar (Chawla & Chawla, 2013; Lin et al., 2024).

MMC performansının belirleyici unsuru çoğu zaman matris veya takviye fazın kendisinden çok, **arayüzün** (kimyasal reaksiyon, bağ dayanımı, termal uyum) davranışdır. Güncel çalışmalar, arayüz reaksiyonlarını sınırlamak için ara tabaka (interlayer) tasarımları, kontrollü ısı çevrimleri ve nano-inokülasyon ile tane inceltme gibi stratejileri tartışmaktadır (Miracle, 2005; Ostolaza et al., 2023). Örneğin, AA2024 gibi yüksek dayanımlı Al alaşımlarının AM ile işlenebilirliğinde sıcak yırtılma ve çatlak oluşumu önemli bir engelken; nano-TiC katkısı ile tane inceltme ve çatlak eğiliminin azaltılabildiğine yönelik çalışmalar raporlanmıştır (Freundl et al., 2024). Bu tür yaklaşımlar, havacılıkta yüksek performanslı Al alaşımlarının AM-uyumlu hâle gelmesi açısından önemlidir.

Öte yandan çok-malzemeli ve derecelendirilmiş yapılarda, kimyasal geçiş bölgesinin kalınlığı ve mikroyapı sürekliliği kritik bir “sertifikasyon parametresi”ne dönüşmektedir. L-PBF’de lazer yeniden ergitme ile karışım bölgesinin artırılması ve daha düzgün bir kompozisyon gradyanı elde edilmesi, bu açıdan doğrudan havacılık güvenilirliği ile ilişkilendirilebilir (Schmidt et al., 2023).

MMC’lerin havacılıkta hâlâ görece niş kalmasının temel nedeni; üretim tekrarlanabilirliği, kalite güvencesi ve maliyet üçgenidir. Yani laboratuvarı iyi sonuç veren bir MMC bileşimi, endüstride (özellikle emniyet-kritik parçalarda) varyasyonu düşük, izlenebilir ve doğrulanabilir bir üretim hattına aktarılmadıkça yaygınlaşamaz (Chawla & Chawla, 2013; Ostolaza et al., 2023). Bu nedenle yakın gelecek eğilimleri şu başlıklarda toplanabilir:

- **AM + FGM entegrasyonu:** CTE uyumsuzluğu ve rezidüel gerilmeler, derecelendirme ile azaltılarak “tasarım serbestliği” artırılabilecektir (Yadav et al., 2024).
- **Süreç izleme ve veri odaklı kalite:** Ergitme havuzu izleme, X-ray/termal sensörler ve süreç verilerinden kusur kestirimi, sertifikasyon maliyetini düşürmenin anahtarıdır (Ostolaza et al., 2023).
- **Onarım ve yaşam döngüsü:** Büyük parçaların yerinde biriktirme ile onarımı ve yüzeyin fonksiyonel olarak güçlendirilmesi (aşınma/ısı bariyer) MMC’leri bakım-onarım ekosistemine daha yakın konumlandıracaktır (Yadav et al., 2024).
- **Çok-malzemeli sistemler ve hibrit tasarım:** Polimer matrisli kompozitlerle birlikte, metalik bölgelerde MMC/FGM kullanımı; “doğru yerde doğru malzeme” yaklaşımını güçlendirecektir (Schmidt et al., 2023).

Bu çerçevede, MMC’lerin havacılıkta yaygınlaşması için kritik eşik; kontrollü arayüz, düşük kusur oranı, standartlaştırılmış süreç penceresi ve maliyet-etkin seri üretim/onarım senaryolarının aynı anda sağlanmasıdır (Ostolaza et al., 2023; Yadav et al., 2024). Bu eşikler aşıldıkça, nano-MMC ve hibrit MMC’ler ile AM-tabanlı FGM/MMC çözümlerinin, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek yorulma yüklemesi altındaki havacılık alt-sistemlerinde daha görünür hâle

gelmesi beklenmektedir (Lin et al., 2024; Schmidt et al., 2023; Freundl et al., 2024).

SONUÇ

Bu kitap bölümünde metal matrisli kompozit malzemeler (MMC), havacılık uygulamaları odağında kapsamlı bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Matris ve takviye seçenekleri, üretim yöntemleri, mekanik ve termal özellikler ile uçak ve uzay sistemlerine yönelik uygulama örnekleri birlikte değerlendirilmiştir. MMC'lerin temel vaadi; metal matrisin süneklik, tokluk ve üretilebilirlik avantajlarını korurken, seramik veya karbon esaslı takviyeler aracılığıyla özgül dayanım, rijitlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık performansı gibi kritik mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Bu özellikler, ağırlık azaltımı, yakıt verimliliği ve yapısal güvenilirliğin kritik olduğu havacılık sistemleri açısından doğrudan önem taşımaktadır.

Havacılık sektöründe MMC'ler özellikle uydu ve uzay yapıları, jet motoru bileşenleri, fren sistemleri ve iniş takımı gibi yüksek performans gerektiren niş uygulamalarda kendine yer bulmuştur. Al-SiC ve Al-Al₂O₃ esaslı kompozitler boyutsal kararlılık ve aşınma direnci sağlarken, Ti-SiC ve Ni esaslı MMC'ler yüksek sıcaklıkta sürünme direnci ve mekanik bütünlük açısından öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin geniş ölçekli ve yaygın kullanımı; üretim maliyetleri, mikroyapı tekrarlanabilirliği, işlenebilirlik ve sertifikasyon gereksinimleri nedeniyle sınırlı kalmıştır.

MMC'lerin havacılıkta hâlen “niş” bir malzeme sınıfı olarak değerlendirilmesinin temel nedenleri; karmaşık üretim süreçleri, takviye-matris arayüzünün hassas kontrol gerektirmesi, bakım-onarım ve birleştirme süreçlerindeki zorluklar ile uzun süreli güvenilirlik verilerinin sınırlı olmasıdır. Özellikle havacılık sertifikasyon süreçlerinde gerekli olan kapsamlı malzeme veri tabanlarının (design allowables) oluşturulması, MMC'ler için zaman ve maliyet açısından önemli bir engel teşkil etmektedir.

Buna karşın, son yıllarda ortaya çıkan nano-takviyeli MMC'ler, hibrit kompozit yaklaşımları ve fonksiyonel derecelendirilmiş yapılar, bu sınırlamaların aşılmasına yönelik umut vadeden çözümler sunmaktadır. Nano-ölçekli takviyeler, doğru dağılım ve arayüz mühendisliği sağlandığında, görece düşük

takviye oranlarında dahi önemli mekanik ve tribolojik kazanımlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Hibrit MMC tasarımları ise tek bir bileşen içerisinde hem yapısal hem de fonksiyonel gereksinimlerin karşılanmasına imkân vermektedir.

Ayrıca eklemeli imalat tabanlı üretim tekniklerinin gelişimi, MMC ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin karmaşık geometrilere ve yerel takviye bölgeleri oluşturularak üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, havacılık bileşenlerinde yalnızca gerekli bölgelerde takviye kullanılarak maliyet, ağırlık ve güvenilirlik arasında daha dengeli bir tasarım yaklaşımının benimsenmesine zemin hazırlamaktadır. Süreç izleme, sayısal modelleme ve veri odaklı tasarım yaklaşımlarının entegre edilmesiyle birlikte, MMC'lerin sertifikasyon süreçlerinin de daha öngörülebilir hâle gelmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, metal matrisli kompozitler günümüzde havacılık sektöründe seçilmiş ve yüksek katma değerli uygulamalarda kullanılan ileri malzemeler olarak konumlanmaktadır. Üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, hibrit ve nano-takviyeli tasarımlar ile dijital doğrulama altyapılarının gelişmesi, MMC'lerin gelecekte daha geniş bir havacılık uygulama yelpazesinde yer almasını mümkün kılacaktır. Bu bağlamda MMC'ler, geleneksel metal alaşımları ile seramik esaslı sistemler arasında köprü kuran stratejik bir malzeme sınıfı olmaya devam edecektir.

KAYNAKLAR

- Bodunrin, M. O., Alaneme, K. K., & Chown, L. H. (2015). Aluminium matrix hybrid composites: A review of reinforcement philosophies, mechanical, corrosion and tribological characteristics. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(4), 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.003>
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM International.
- Cantor, B., Assender, H., & Grant, P. (2004). *Aerospace materials*. Institute of Physics Publishing.
- Casati, R., & Vedani, M. (2014). Metal matrix composites reinforced by nanoparticles—A review. *Metals*, 4(1), 65–83. <https://doi.org/10.3390/met4010065>
- Chawla, N. (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed.). Springer.
- Chawla, N., & Chawla, K. K. (2013). *Metal matrix composites*. Springer.
- Clyne, T. W., & Withers, P. J. (1993). *An introduction to metal matrix composites*. Cambridge University Press.
- Froes, F. H. (2015). *Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications*. ASM International.
- Kainer, K. U. (Ed.). (2006). *Metal matrix composites: Custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Wiley-VCH.
- Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH.
- Li, Y., Zhou, Y., Wang, X., & Liu, Z. (2020). A review on functionally graded materials and structures via additive manufacturing. *Advanced Materials Technologies*, 5(3), 1900981. <https://doi.org/10.1002/admt.201900981>
- Lin, F., Ren, M., Zhu, L., Jia, F., & Zhang, H. (2024). Graphene-reinforced aluminium matrix nanocomposites: Fabrication, properties and applications. *Advanced Nanocomposites*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.adna.2024.12.001>
- Lloyd, D. J. (1994). Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. *International Materials Reviews*, 39(1), 1–23. <https://doi.org/10.1179/imr.1994.39.1.1>

- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—From science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65(15–16), 2526–2540. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Ostolaza, M., Arrizubieta, J. I., Lamikiz, A., Plaza, S., & Ortega, N. (2023). Latest developments to manufacture metal matrix composites and functionally graded materials through additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Materials*, 16(4), 1746. <https://doi.org/10.3390/ma16041746>
- Pollock, T. M., & Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure, and properties. *Journal of Propulsion and Power*, 22(2), 361–374. <https://doi.org/10.2514/1.18239>
- Qadir, J., Savio Lewise, A., Jims John Wessley, G., & Diju Samuel, G. (2023). Influence of nanoparticles in reinforced aluminium metal matrix composites in aerospace applications—A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.414>
- Seyed Pourmand, N., & Asgharzadeh, H. (2020). Aluminum matrix composites reinforced with graphene: A review on production, microstructure, and properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(4), 289–337. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1632792>
- Singla, D. (2015). CNT reinforced aluminium matrix composite—A review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2886–2895. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.248>
- Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28(1–2), 319–334. <https://doi.org/10.1007/BF02717141>
- Tajzad, I., & Ghasali, E. (2020). Production methods of CNT-reinforced Al matrix composites: A review. *Journal of Composites and Compounds*, 2(3), 69–76.
- Taya, M., & Arsenault, R. J. (1989). *Metal matrix composites: Thermomechanical behavior*. Pergamon Press.

- Torralba, J. M., da Costa, C. E., & Velasco, F. (2014). P/M aluminum matrix composites: An overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10), 2067–2076. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.028>
- Yadav, S., Liu, S., Singh, R. K., & Sharma, A. K. (2024). A state-of-the-art review on functionally graded materials manufactured by 3D printing techniques: Advantages, existing challenges and future scope. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 2051–2072. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.026>

BÖLÜM 4

MÜHENDİSLİKTE KLASİK DÖNÜŞÜMLER: ZAMAN, FREKANS VE ÖLÇEK ANALİZİ

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI ¹

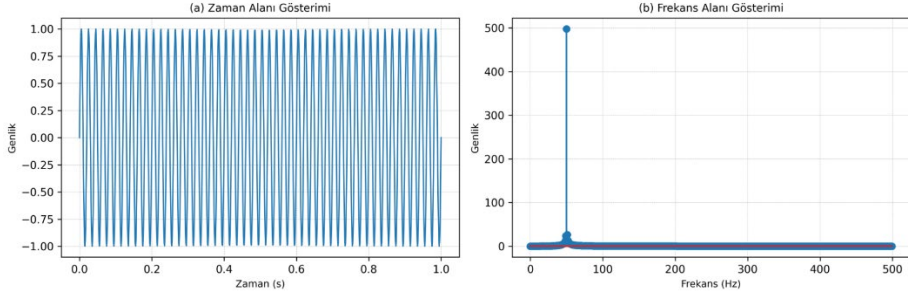
DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146381>

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4654-5140 kiremdanaci@sivas.edu.tr Orcid ID: 0000-0002-9148-1481.

GİRİŞ

Sinyal analizi, farklı türdeki sinyallerin incelenmesi, dönüştürülmesi ve anlamlandırılması amacıyla kullanılan bir mühendislik ve bilim dalıdır. Temel olarak, bilginin taşınması, kaydedilmesi veya işlenmesi sürecinde sinyallere uygulanan matematiksel işlemler bütünü olarak tanımlanabilir. Bu işlemler, karmaşık verilerin anlamlandırılmasını, sistem davranışlarının çözülmesini ve ölçüm sonuçlarından anlamlı bilgiler elde edilmesini sağlar. Bu nedenle sinyal analizi, modern mühendislik ve bilim alanlarının temel taşlarından biridir. Doğada ve mühendislik sistemlerinde karşılaşılan veriler, genellikle bir fiziksel niceliğin zamana, uzaya veya başka bir bağımsız değişkene göre değişimini temsil eden sinyaller biçimindedir. Sinyal, zamana veya başka bir değişkene bağlı olarak değişen bir niceliğin ifadesidir. Örneğin, ses, EEG, elektrik akımı, radar yansıması ve gerilim gibi büyüklükler birer sinyaldir. Bu sinyalleri zamanla değişen birer veri dizisi gibi düşünmek mümkündür. Dolayısıyla bu tür sinyaller zamana göre değiştiği için genellikle zaman alanında (time domain) incelenir. Ancak bazı durumlarda sinyalin yalnızca zaman alanındaki davranışını incelemek yeterli olmaz. Örneğin, bir konuşma sinyalindeki gürültü bileşenini gidermek veya iki farklı radyo istasyonunun karışımını ayırmak, zaman düzleminde doğrudan sinyal genliklerine bakarak neredeyse imkânsızdır. Sinyalin hangi frekanslardan oluştuğunu, enerji dağılımı gibi özelliklerini anlamak için farklı incelemeler yapılması gerekir. Bu durum, analizin daha uygun ve ayrıştırıcı bir düzleme taşınması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun sonucunda dönüşüm (transformation) kavramı ortaya çıkmıştır (Pollock, n.d.; van Drongelen, 2007).

Dönüşümler, sinyali farklı bir uzayda temsil ederek onu zaman alanının dışında incelememizi sağlar. Bu, bir sinyali, yeni bir "temel küme" (veya baz) fonksiyonlarının lineer kombinasyonu olarak ifade etmek anlamına gelir. Böylece, sinyali frekans alanında ele alabilir, hangi frekans bileşenlerinden oluştuğunu ve enerjinin hangi bölgelerde yoğunlaştığını gözlemleyebiliriz. Dönüşüm sonucu elde edilen bilgiler, sinyalin karakterini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır (Richter et al., 2022). Şekil 1.1'de, basit bir 50 Hz'lik sinüsoidal sinyalin zaman ve frekans alanındaki gösterimi verilmiştir. Zaman düzleminde dalga şeklinde görünen sinyalin, frekans düzleminde yalnızca tek bir bileşen olarak ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 1.1: Basit bir sinüsoidal sinyalin a) zaman düzlemindeki ve b) frekans düzlemindeki gösterimi

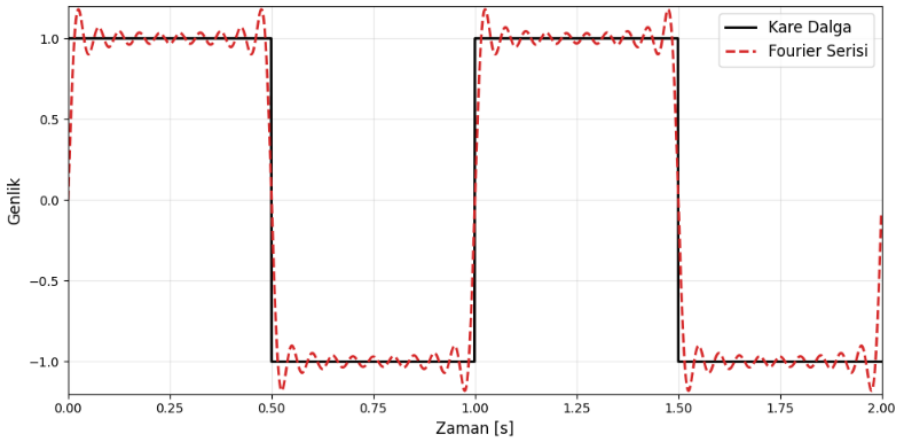
Sinyal işleme literatüründe en sık kullanılan dönüşümler Fourier Dönüşümü (FT) (Salomon Bochner, n.d.; van Drongelen, 2007), Z dönüşümü(Sullivan, 1996), Laplace dönüşümü(Schiff, n.d.) ve Dalgalet (Wavelet) Dönüşümüdür(Zhang, 2019). Fourier dönüşümü, bir sinyali sonsuz uzunluktaki sinüzoid bileşenlerine ayırırken; wavelet dönüşümü hem zaman hem frekans bilgisini aynı anda sunarak geçici olayların incelenmesine imkân tanır. Buda farklı dönüşümlerin çeşitli sinyaller için farklı amaçlarda kullanılmasını sağlar.

Bu kitap bölümü, sinyal analizinde kullanılan dönüşüm yöntemlerinin tarihsel gelişimini kronolojik ve sistematik bir çerçevede ele almaktadır. İçerik, temel prensiplerden başlayarak klasik dönüşümlerin zamansal bilgiyi sınırlı temsil etme özelliklerini tartışmakta; ardından sinyalin yerel davranışını yakalamak üzere geliştirilmiş yöntemlere geçiş yapmaktadır. Bölüm süresince her dönüşümün matematiksel temelleri, temel özellikleri ve güncel uygulama alanları kapsamlı biçimde incelenmiştir. Ayrıca teorik içeriğin uygulama ile bütünleşmesi amacıyla, her yöntem için Python ortamında gerçekleştirilen örnek çalışmalar ve elde edilen grafiksel çıktılar sunulmuştur. Böylece okuyucunun dönüşümlerin davranışlarını hem matematiksel açıdan hem de görsel olarak kavraması hedeflenmiştir.

FOURIER DÖNÜŞÜMÜNÜN ORTAYA ÇIKIŞI

FT temelleri, Fransız matematikçi ve fizikçi Jean Baptiste Joseph Fourier tarafından 1822 yılında yayımlanan “Théorie Analytique de la Chaleur” (Isının Analitik Teorisi) adlı eserde atılmıştır. Fourier, bu çalışmasında bir ortamda ısıнын zamanla nasıl yayıldığını incelemiş ve ısı dağılımını açıklamak için yenilikçi bir yaklaşım önermiştir. Ona göre, karmaşık bir sıcaklık değişimi

fonksiyonu, farklı frekanslara sahip sinüzoidal bileşenlerin toplamı olarak ifade edilebilirdi (Osgood, 2014). Şekil 2.1’de, zaman alanında bir kare dalga sinyali ve bu sinyalin Fourier serisi kullanılarak yaklaşık olarak yeniden oluşturulmuş sinüs bileşenleri gösterilmektedir; bu görsel, karmaşık bir periyodik sinyalin temel sinüzoidal bileşenlerinin toplamı ile nasıl temsil edilebileceğini açıkça ortaya koymaktadır. Fourier’in yaklaşımı, yayımlandığı dönemde bilim çevrelerinde büyük tartışmalara yol açmıştır. Fonksiyonların trigonometrik serilerle ifade edilebileceği fikri, dönemin matematik anlayışına göre oldukça sıra dışıydı ve birçok bilim insanı başlangıçta bunun geçerliliğini sorgulamıştır. Daha sonraki yıllarda Dirichlet ve diğer matematikçilerin yaptığı çalışmalar, Fourier serilerinin teorik temellerini güçlendirmiş ve yöntemin matematiksel olarak kabul görmesini sağlamıştır (Gibson, 1892). Böylece Fourier’in çalışmaları, yalnızca ısı iletimi problemlerini çözmekle kalmamış, modern sinyal analizinin kapısını da aralamıştır.



Şekil 2.1. Zaman alanında bir kare dalga sinyali ve onun Fourier serisi ile temsil edilen sinüs bileşenleri

Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse, Fourier herhangi bir periyodik fonksiyonun, Formül 2.1’de gösterildiği gibi, sinüs ve kosinüs terimlerinin lineer birleşimi şeklinde yeniden yazılabileceğini ortaya koydu. Bu ifade, günümüzde sinyal analizinin temelini oluşturmakla beraber, iletişimden tıbbi görüntülemeye, ses işleme uygulamalarından elektrik mühendisliğine kadar birçok alanda geniş bir kullanım alanı bulan Fourier serilerinin temelini oluşturmaktadır (Sneddon, n.d.).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0t) + b_n \sin(nw_0t)] \quad 2.1$$

Fourier serisi ilk aşamada yalnızca periyodik sinyallerin analizinde kullanılan bir yöntemdi. Zamanla periyodik olmayan veya teorik olarak sonsuz uzunluktaki sinyallerin de frekans bileşenleriyle ifade edilebileceğinin anlaşılmasıyla birlikte, bu yaklaşım genelleştirilmiş ve Fourier dönüşümü halini almıştır. Bu sayede bir sinyalin **frekans spektrumu** elde edilebilmekte ve sinyalin hangi frekans bileşenlerinden oluştuğu detaylı bir şekilde incelenebilmektedir.

Fourier dönüşümünün ortaya çıkışı; sinyal işleme, görüntü analizi, ısı ve dalga denklemlerinin çözümü, optik sistemlerin modellenmesi ve elektronik filtre tasarımı gibi birçok modern mühendislik alanının gelişimi için kritik bir adım olmuştur. Daha sonraki yıllarda **Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)** (Brigham, 1988) algoritmasının geliştirilmesi, hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmış ve Fourier analizinin pratik olarak her alanda uygulanabilmesine imkân tanımıştır. Ayrıca kısa-zamanlı Fourier dönüşümü (Short-Time Fourier Transform, STFT) (Owens & Murphy, 1988), zamanla değişen sinyallerin analizi için geliştirilmiş bir diğer önemli yöntemdir. Günümüzde bu dönüşümler; ses işleme, görüntü sıkıştırma, titreşim ve yapısal sağlık analizi, güç kalitesi ölçümleri, radar ve haberleşme sistemleri ile biyomedikal sinyal işleme gibi çok geniş bir uygulama yelpazesinin temelini oluşturmaktadır.

ZAMAN-FREKANS DÜZLEMİ DÖNÜŞÜMLERİ: SİNYALİN YEREL ANALİZİ

Fourier dönüşümü temel olarak, bir sinyali zaman alanındaki temsilinden frekans alanındaki temsil biçimine dönüştürme işlemini yapar (Sneddon, n.d.). Bu dönüşüm, sinyali oluşturan bileşenlerin frekanslara göre dağılımını dağılımını ortaya çıkarır ve özellikle sinyal işleme, akustik, optik, haberleşme, güç sistemleri ve titreşim analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Cooley & Tukey, 1965).

FT, sinyal analizinde sürekli zaman ve ayrık zaman olmak üzere iki ana formda incelenir. Sürekli sinyal $x(t)$ için Fourier Dönüşümü (CTFT) (Mandal & Asif,

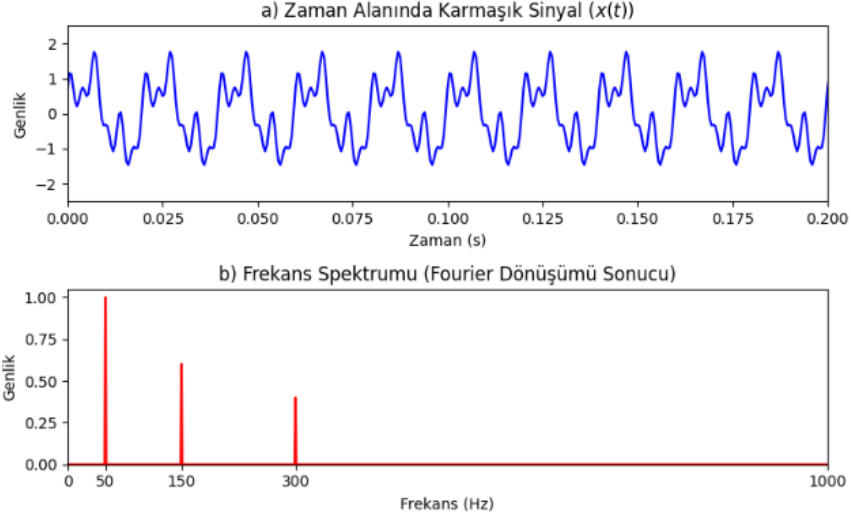
2007), Formül 3.1'de ifade edildiği gibidir. Bu ifade, sinyalin her bir frekansta ne kadar bileşen içerdiğini belirleyen karmaşık bir fonksiyon üretir.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad 3.1$$

Bu formül, sinyalin tüm ω frekanslarında ne kadar $e^{j\omega t}$ bileşeni içerdiğini hesaplar. Sinyali orijinal zaman düzlemine geri getiren Ters Fourier Dönüşümü ise Formül 3.2 ile tanımlanır.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad 3.2$$

$X(\omega)$ 'nın genliği, ilgili frekanstaki enerji veya güç miktarını; fazı ise o bileşenin zaman içindeki konumunu (faz farkını) temsil eder. Matematiksel olarak bu, sinüzoidal bileşenlere ayrıştırılmış bir sinyalin, her bir sinüs dalgası için belirli bir frekansa karşılık gelmesini ifade eder. Böylece sinyal, frekans spektrumu olarak elde edilir. Bu sayede, zaman alanında karmaşık görünen bir sinyal, düzenli frekans bileşenleri aracılığıyla rahatça analiz edilebilir. Şekil 3.1'de üç farklı sinüs dalgasının toplamından oluşan karmaşık bir sinyalin zaman ve frekans alanındaki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Karmaşık bir sinyalin frekans spektrumu, a) zaman alanı, b) frekans alanı

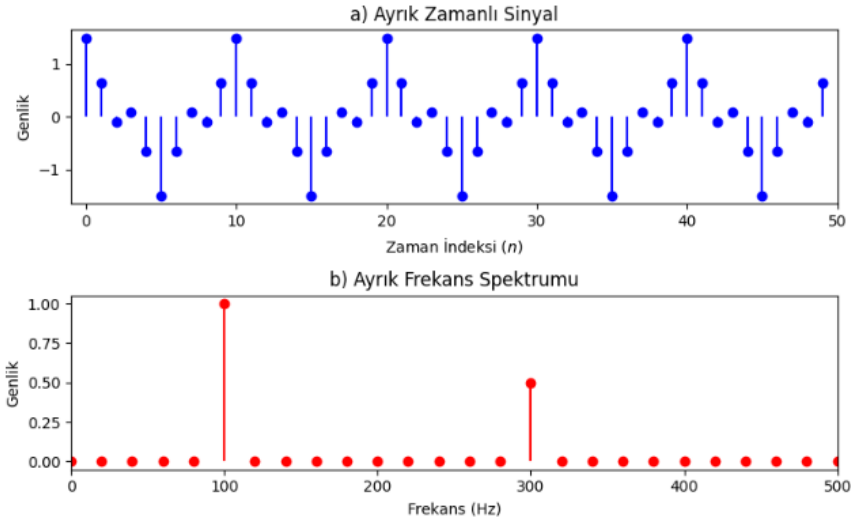
Dijital sinyaller düşünüldüğünde bu sinyaller genellikle örneklenmiş (ayrık, discrete) biçimdedir. Ayrık zamanlı sinyaller $x[n]$ için, CTFT'nin ayrık hali olan Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) (Mandal & Asif, 2007) Formül 3.3 ile tanımlanır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, ayrık sinyallerin analizi sonucunda, frekans spektrumu da ayrık frekans katsayıları olarak elde edilir.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad 3.3$$

Ters Dönüşüm ise Formül 3.4 ile ifade edilir:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi kn/N} \quad 3.4$$

Burada: N örnek sayısını, $x[n]$ zaman alanındaki örnekleri ve $X[k]$ frekans alanındaki katsayıları ifade eder. DFT'nin önemli bir matematiksel sonucu, frekans spektrumunun 2π periyodu ile periyodik olmasıdır (Cai, 1999).



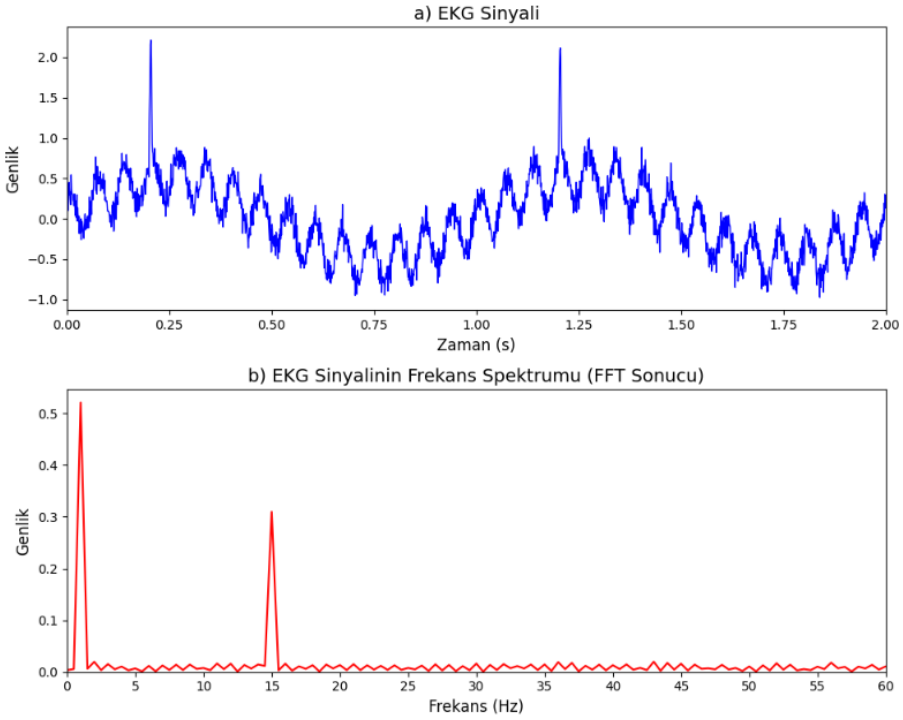
Şekil 3.2. Ayrık bir sinyalin a) zaman alanı gösterimi, b) frekans spektrumu

Fourier dönüşümünün yaygınlaşmasından sonra, 1965 yılında James W. Cooley ve John W. Tukey, DFT'yi hızlı hesaplamayı sağlayan Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) algoritma geliştirdiler (Cooley & Tukey, 1965; Sneddon, n.d.). Bu algoritma, Formül 3.5'te ifade edildiği gibi DFT'yi “parçalara böl ve yönet” mantığıyla hesaplar. Burada, N noktalı bir DFT, iki adet $N/2$ noktalı DFT'ye bölünür. Matematiksel olarak, $X[k]$ 'nin hesaplanması tek ve çift indisli terimlere ayrılarak ifade edilebilir.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]e^{-j2\pi k(2n)/N} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]e^{-j2\pi k(2n+1)/N} \quad 3.5$$

FFT algoritması sayesinde Fourier analizi, gerçek zamanlı sinyallerde dahi uygulanabilir hale gelmiştir. Spektrum analizörleri, osiloskoplar, EEG/EMG sistemleri, güç kalite analizörleri gibi cihazlarda standart bir araç olarak yerini almıştır (Smith, 1997). FFT, güç kalitesi analizi, görüntü işleme, titreşim analizi

ve telekomünikasyon gibi birçok çalışma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. FFT'nin biyomedikal uygulamalardaki gücüne bir örnek olarak, bir elektroensefalogram (EKG) sinyalinin frekans analizi verilebilir (Jembula et al., 2013). Şekil 3.3'te, zaman alanında karmaşık görünen örnek bir EKG sinyalinin, FFT uygulandıktan sonra frekans spektrumunda temel kalp atış hızına karşılık gelen bileşenlerin nasıl belirginleştiği açıkça gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Simüle Edilmiş EKG Sinyalinin Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile a) Zaman ve b) Frekans Alanı Analizi.

Aşağıda son yıllarda FFT kullanılarak yapılan bazı güncel çalışmalar özetlenmiştir:

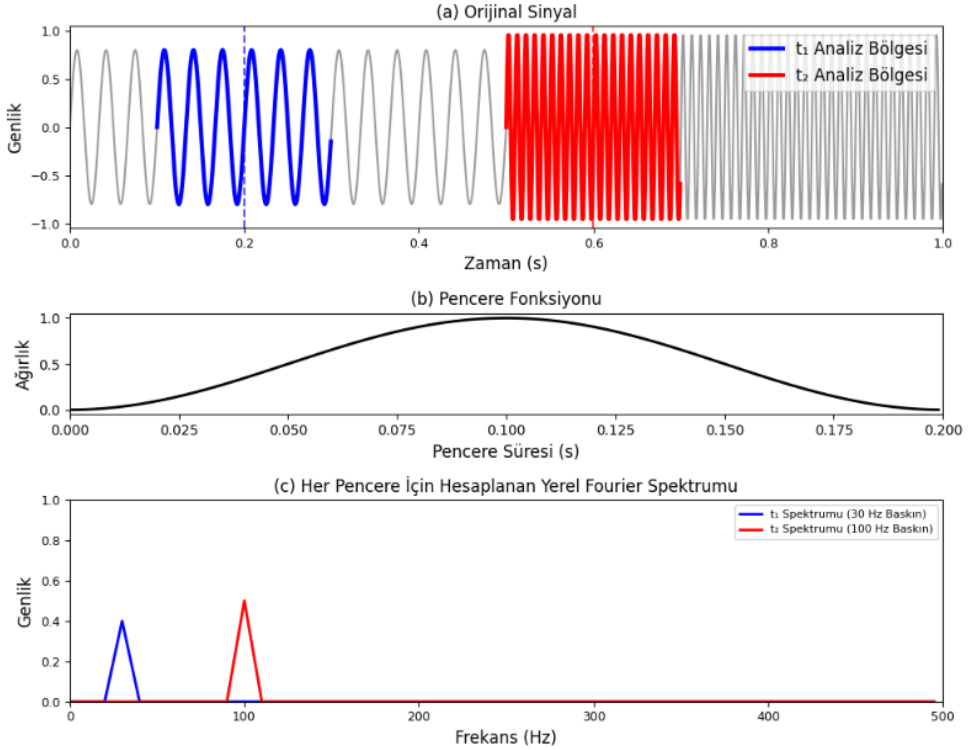
- **“Zero-Phase Sound via Giant FFT”** (*Zero-Phase Sound via Giant FFT*, n.d.): Bu çalışma, orijinal sinyalin spektral özelliklerini değiştirmeden, ancak zaman alanındaki olayları (geçici etkileri) kontrol ederek "sıfır fazlı" ses sinyalleri elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu,

FFT'nin ses işleme alanında, spektral kontrol ve faz manipülasyonu için nasıl kullanılabileceğini gösteren bir örnektir.

- **“FFT-Based Simultaneous Calculations of Very Long Signal”** (Wu & Low, 2024): Bu makalede, uzun sinyal verilerinde spektrum analizinin verimli bir şekilde yapılabilmesi için FFT temelli bir yöntem önerilmiştir. Amaç, farklı frekans aralıkları için ayrı FFT'ler kullanmak yerine, aynı anda farklı çözünürlük düzeyleriyle spektral analiz yapabilmektir. Bu uygulama, özellikle zamanla değişen, geniş bantlı sinyallerde hesaplama maliyetini azaltmak açısından önemlidir.
- **“An efficient light-weighted signal reconstruction method consists of Fast Fourier Transform and Convolutional-based Autoencoder”** (Kow & Kow, 2025): Bu çalışmada, bozulmuş veya kesikli (interrupted) ses sinyalini yeniden yapılandırmak için bir model önerilmiştir: FFT ve Evrişimsel Otomatik Kodlayıcı (Convolutional Autoencoder) yaklaşımı. Bu, FFT'nin yalnızca sinyal analizi değil, sinyal restorasyonu ve tamamlama alanında da kullanılabileceğini gösteren uygulamalı bir örnektir.

Fourier tabanlı dönüşümler, sinyalin incelenen tüm zaman aralığı için aynı istatistiksel özelliklere (stationarity) sahip olduğunu varsayar. Oysa gerçek sinyallerin büyük çoğunluğu ise bu olay tam tersidir yani zamana göre değişen (non-stationary) yapıya sahiptir. Bu durum, Fourier dönüşümünün en büyük sınırlamasını teşkil eder (Brigham, 1988). Örneğin, konuşma, biyomedikal ölçümler (EKG/EEG) ya da güç sistemi bozulmaları gibi sinyaller non-stationary yapıya sahiptir. Fourier dönüşümü bu tür sinyallerin frekans bileşenlerini ortaya çıkarabilir, ancak bu değişimlerin zaman içinde ne zaman gerçekleştiği bilgisi kaybedilir. Bu sebeple kimi zaman zamanla değişen sinyalleri Fourier dönüşümü ile analiz etmek yeterli olmamaktadır (Owens & Murphy, 1988). Bu sınırlama, zaman-frekans analizinin (Time-Frequency Analysis) doğmasına yol açmıştır. Zaman-frekans analizi, bir sinyalin hem zaman hem de frekans içeriğini eş zamanlı olarak gözlemlememizi sağlar. Bu yaklaşımın temel fikri, sinyali kısa zaman aralıkları içinde analiz ederek, her bir aralık için ayrı bir frekans spektrumu elde etmektir. Böylece frekansların zamanla nasıl değiştiği izlenebilir.

Bu amaçla geliştirilen ilk yöntemlerden biri 1946'da Nobel fizikçisi Dennis Gabor tarafından önerilen Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (Short-Time Fourier Transform, STFT)'dür (Gabor, 1946). STFT, sinyali belirli uzunluktaki bir pencere fonksiyonu ile böler ve kaydırılan her pencere için Fourier dönüşümünü hesaplar. Böylece, zaman ve frekans olmak üzere iki boyutlu bir temsil elde edilir. Bu sayede, sinyalin hangi anda hangi frekans bileşenlerine sahip olduğu net bir şekilde görülebilir. Bu prensip, Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) orijinal sinyal, b) kayan pencere, c) her pencere için hesaplanan yerel Fourier spektrumu.

Sürekli zamanlı sinyal $x(t)$ için STFT'nin matematiksel ifadesi Formül 3.6 ile verilmiştir (Cohen, 1995).

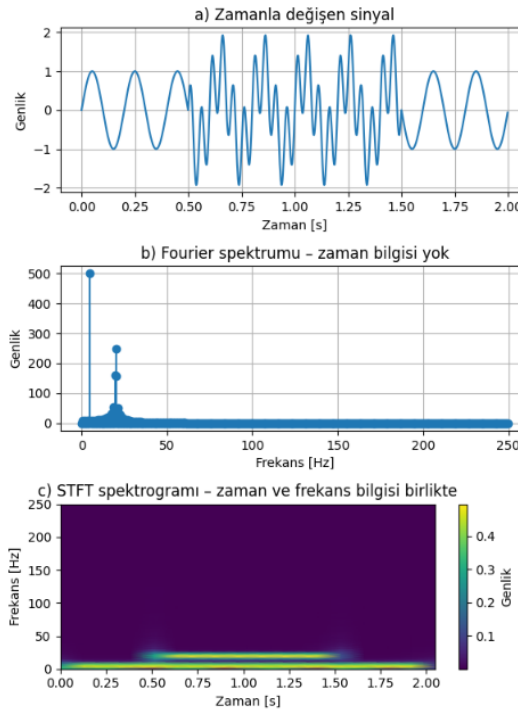
$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad 3.6$$

Burada, $x(t)$ orijinal zaman alanı sinyali, $w(t-\tau)$ τ kadar kaydırılmış pencere fonksiyonu, τ zaman kaydırma parametresi, ω radyan/saniye cinsinden açısal frekansı ifade eder.

Eğer veri ayrık zamanlı bir sinyal ise STFT, Formül 3.7'deki gibi ifade edilir:

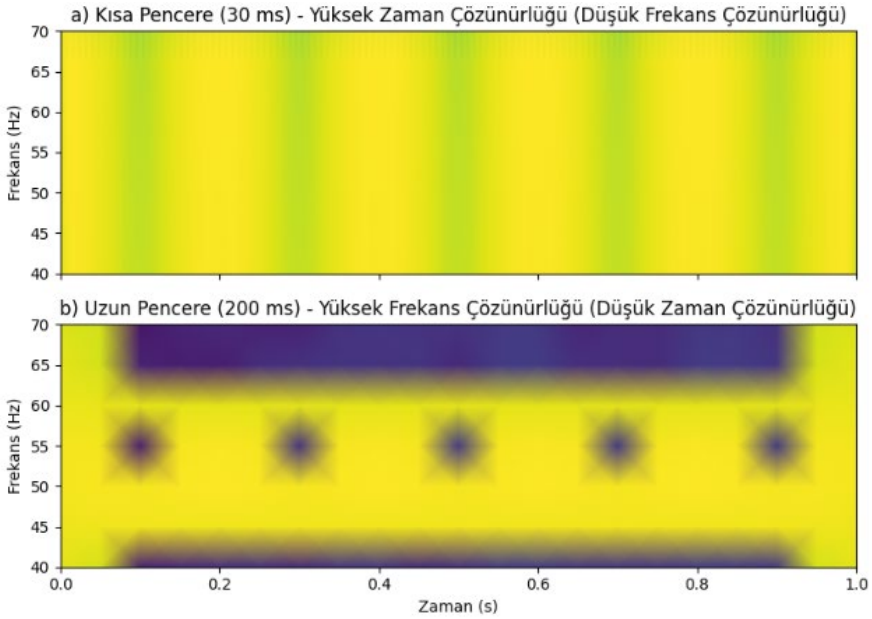
$$X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j\omega n} \quad 3.7$$

STFT, temel olarak pencere içindeki kısa sinyallerin DFT/FFT'sini hesaplar; yani STFT, Fourier dönüşümünün zaman pencerelenmiş versiyonu olarak düşünülebilir. Bu işlem sonucunda elde edilen iki boyutlu fonksiyona spektrogram (spectrogram) adı verilir. Spektrogram, frekans içeriğinin zamanla değişimini gösteren bir haritadır. Örnek Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. a) Zamanla değişen sinyal, b) Fourier spektrumu, c) STFT spektrogramı

Ancak, STFT ile Fourier dönüşümü sınırlaması tamamen ortadan kalkmamıştır. STFT pencere boyutu, zaman ve frekans çözünürlüğü arasında doğrudan bir denge unsuru olarak kritik bir rol oynar. Bu durum, Heisenberg Belirsizlik İlkesi'nin bir yansımasıdır. Burada, Kısa pencereler zaman çözünürlüğünü artırırken frekans çözünürlüğünü düşürür; uzun pencereler ise bunun tersini yapar. Bu nedenle STFT'de hem yüksek zaman hem yüksek frekans çözünürlüğünü aynı anda elde etmek mümkün değildir. Pencere boyutlarının farklarına örnek Şekil 3.6'da verilmiştir (Durak & Arikan, 2003; Gabor, 1946).



Şekil 3.6. a) Dar pencere, b) Geniş pencere için Spektrogram örnekleri

STFT uygulamalarında pencere fonksiyonunun tipi, dönüşümün sonucunu doğrudan etkileyen bir diğer önemli parametredir. Pencere fonksiyonları, sinyalin belirli bir zaman aralığında ağırlıklandırılmasını sağlayarak, kenar etkilerini azaltmak ve spektral sızıntıyı (spectral leakage) kontrol etmek amacıyla kullanılır. En yaygın pencere türleri arasında rektangüler (düzgün), Hamming, Hanning (Hann) ve Gaussian pencereleri yer alır (Podder, 2014). Rektangüler pencere, ani geçişli yapısı nedeniyle yüksek çözünürlük sağlar ancak spektral sızıntıya oldukça duyarlıdır. Hamming ve Hanning pencereleri ise daha iyi yan lob bastırımı sunarak frekans eksenindeki sızıntıyı azaltır; bu da özellikle düşük genlikli bileşenlerin daha sağlıklı ayrıştırılmasına olanak

tanır. Gaussian penceresi, zaman ve frekans alanlarında simetrik özellikleriyle öne çıkar ve belirsizlik ilkesine göre optimal çözünürlük sunar (Gautam et al., 2015). Uygulama alanına bağlı olarak pencere tipi, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve yorumlanabilirliğini doğrudan etkileyebileceğinden, dikkatle seçilmelidir. Yaygın pencere türleri şunlardır Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Yaygın Pencere Türleri ve Özellikleri

Pencere	Matematiksel Tanım	Temel Özellik
Rectangular (Dikdörtgen)	$w(t) = 1$	Keskin kenarlı, yüksek sızıntı (leakage)
Hamming	$w(t) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$	Orta derecede yan lob
Hanning	$w(t) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$	Dengeli çözünürlük
Gaussian	$w(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	Minimum belirsizlik, zaman ve frekans alanlarında pürüzsüz geçiş

STFT, özellikle frekans içeriği zamanla değişen sinyallerin incelenmesinde yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biridir. **STFT; ses işleme, titreşim analizi, EEG/EMG gibi biyomedikal ölçümler, radar sistemleri ve yapısal sağlık izleme** gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. **Aşağıda, STFT’nin kullanım alanlarına ve son yıllarda gerçekleştirilen bazı örnek çalışmalara yer verilmiştir.**

Kullanım Alanları

- **Konuşma Sinyali Analizi:** Konuşmanın zamanla değişen frekans içeriğinin ve formant yapısının incelenmesi (fonetik ve dilbilimsel analiz).
- **Radar ve Sonar Uygulamaları:** Hareketli hedeflerin hızlarını (Doppler kayması) ve konumlarını aynı anda takip etmek.

- **Müzik Analizi:** Bir müzik parçasında enstrümanların hangi anda çaldığını ve hangi notaların (frekans bileşenlerinin) üretildiğini görselleştirmek.

Örnek Çalışmalar;

- **“Seizure Prediction in EEG Signals Using STFT and Domain Adaptation”** (Peng et al., 2022): Bu çalışmada epileptik nöbetleri önceden tahmin edebilmek için EEG sinyalleri analiz edilmiştir. STFT uygulanarak EEG verilerinin zaman-frekans temsili elde edilmiş, ardından bu temsiller makine öğrenimi yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Bu örnek, STFT’nin nörolojik sinyallerin analizinde güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.
- **“Application of the STFT for Detection of the Rotor Unbalance of a Servo-Drive System with an Elastic Interconnection”** (Ewert et al., 2024): Bu çalışmada döner makine sistemlerinde rotor dengesizliğinin tespiti için STFT kullanılmıştır. Zamanla değişen mekanik titreşim sinyalleri STFT ile analiz edilmiş ve dengesizlik bileşenlerinin zaman-frekans düzlemindeki davranışları incelenmiştir. Bu yaklaşım, sistemde oluşan yapısal anormalliklerin erken tespiti açısından önem taşımaktadır.
- **“Multimodal apnea detection: advancements through convolutional neural networks and STFT analysis of EEG, ECG, and nasal signals to tackle key challenges in innovation”** (Ghafourian et al., 2025): Bu çalışmada EEG, EKG ve burun hava akışı sinyalleri birlikte değerlendirilmiş; STFT ile zaman-frekans özellikleri çıkarılmış ve bu özellikler derin öğrenme modellerine (örneğin CNN tabanlı bir sınıflandırıcıya) giriş olarak verilmiştir. Çalışmanın sonucunda uyku apnesinin otomatik olarak tespit edilebildiği gösterilmiştir.

ÇOK ÖLÇEKLİ ANALİZ: WAVELET DÖNÜŞÜMÜ

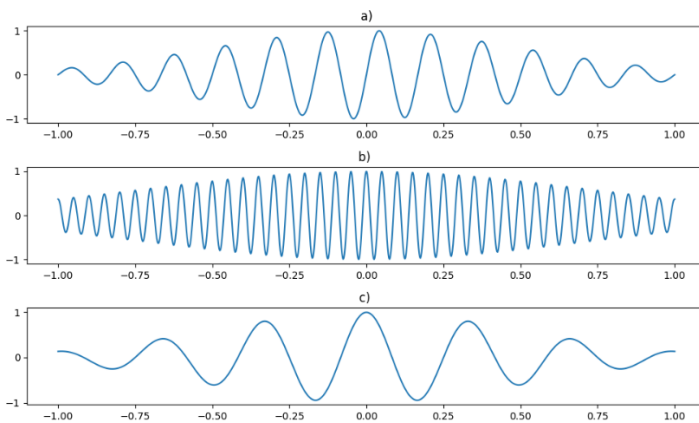
Fourier tabanlı dönüşümlerde kullanılan pencere boyutu sabit olduğu için, yüksek ve düşük frekans bileşenlerinin aynı çözünürlükte incelenmesi mümkün değildir. Bu sınırlamaya alternatif olarak 1980’lerde geliştirilen **Wavelet (Dalgaçık) Dönüşümü (WT)**, farklı frekanslar için değişen pencere boyutları kullanarak sinyali çözümlemeyi sağlar (*A Wavelet Tour of Signal Processing*,

n.d.). Yüksek frekanslı bileşenler kısa pencerelerle, düşük frekanslı bileşenler ise uzun pencerelerle incelenmesine olanak sağlayan bu dönüşüm, zamana bağlı değişen sinyallerin çok ölçekli analizinde oldukça etkilidir.

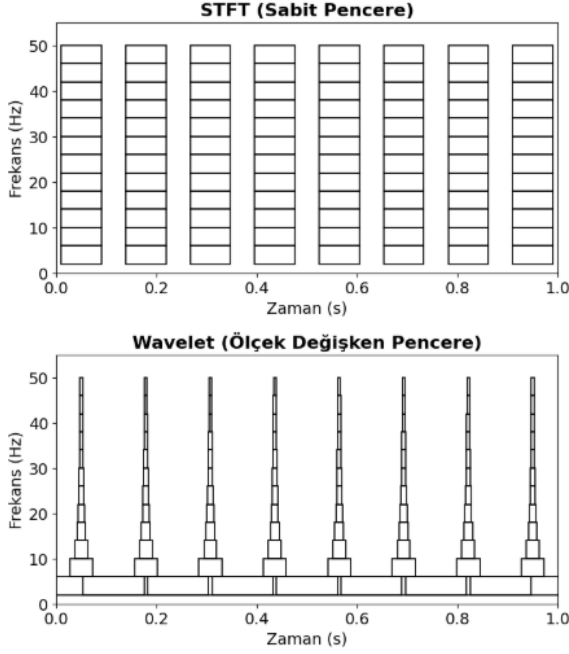
DT, analizi iki temel operasyonla gerçekleştirir: Öteleme ve ölçekleme.

- Öteleme: Dalgacığın sinyal boyunca hareket ettirilmesi,
- Ölçekleme: Dalgacığın sıkıştırılması veya gerilmesi olarak ifade edilir.

Bu sayede, Küçük ölçekler (sıkıştırılmış dalgacık), yüksek frekans bileşenlerini yüksek zaman çözünürlüğüyle inceler. Büyük ölçekler (genişletilmiş dalgacık), düşük frekans bileşenlerini yüksek frekans çözünürlüğüyle inceler. Böylece WT, STFT'deki sabit zaman–frekans çözünürlüğü sınırlamasını ortadan kaldırarak, sinyalin hem lokal hem de küresel özelliklerini artırılmış esneklikle inceleme imkânı sunar. Şekil 4.1, bir sinyalin çok-ölçekli incelenmesine ilişkin temel fikri göstermektedir. Üst panel orijinal zaman-domeni sinyalini verirken, ortadaki panel küçük ölçekli (sıkıştırılmış) dalgacığın biçimini ve alttaki panel büyük ölçekli (genişletilmiş) dalgacığın biçimini göstermektedir. Şekil 4.2'de STFT ve Wavelet dönüşümleri için zaman-frekans çözünürlük alanları verilmiştir. STFT'de tüm frekans bantları sabit bir zaman penceresiyle bölünerek zaman-frekans düzleminde eşit zaman çözünürlüğü sağlar; buna karşılık Wavelet dönüşümünde pencere genişliği frekansa bağlı olarak değişir — yüksek frekansta dar (iyi zaman çözünürlüğü), düşük frekansta geniş (iyi frekans çözünürlüğü) pencereler kullanılır.



Şekil 4.1. a) Orijinal sinyal, b) Küçük ölçekli / yüksek frekans dalgacığı, c) Büyük ölçekli / düşük frekans dalgacığı



Şekil 4.2. STFT (sabit pencere) ve Wavelet (ölçek-değişken pencere) Zaman-Frekans Çözünürlük Alanı

Wavelet dönüşümü, belirli bir temel fonksiyonu (ana dalga fonksiyonu, mother wavelet) ile elde edilir. Bu fonksiyon $\psi(t)$, zaman içerisinde sınırlı bir bölgede yoğunlaşan ve osilasyonlu bir yapıya sahip bir çekirdek fonksiyondur. Bu fonksiyonun Formül 4.1’le ifade edildiği gibi ortalama değerinin sıfır olması gerekmektedir (*A Wavelet Tour of Signal Processing*, n.d.).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad 4.1$$

Sürekli zamanlı bir $f(t)$ sinyalinin Sürekli Wavelet Dönüşümü (Continuous Wavelet Transform, CWT) Formül 4.2’deki şekilde tanımlanır (Oppenheim et al., 2011):

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad 4.2$$

Burada: $W_f(a, b)$: sinyalin a, b parametrelerinde wavelet katsayısı, a ölçek (frekansın tersi), b ise öteleme (zaman) parametresi anlamına gelir. Katsayıların büyüklüğü, sinyalin ilgili bölgede wavelet fonksiyonu ile ne kadar benzeştiğini gösterir. Böylece, küçük ölçekler yüksek frekans bileşenlerini, büyük ölçekler ise düşük frekans bileşenlerini temsil eder. $\bar{\psi}$: wavelet fonksiyonunun karmaşık eşleniğini ifade eder. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDT), bir $x(t)$ sinyalinin $\psi(t)$ ana dalgacığı ile korelasyonu olarak tanımlanır.

Wavelet fonksiyonu, analiz türüne göre seçilir. Yaygın olarak kullanılan Morlet, Daubechies (dbN), Haar, Symlet, Meyer gibi dalgacıklar sabit parametrelere sahip analitik fonksiyonlardır (Mallat, 1989). Ancak gerçek sinyaller çoğu zaman non-stationary yapıdadır ve frekans içeriği zamanla değişebilir. Bu nedenle sabit wavelet fonksiyonları her durumda yeterli esnekliği sağlayamaz. Bu durum, klasik wavelet dönüşümünde hâlâ belirli bir sınırlılık bulunduğunu göstermektedir.

Wavelet'ler, analiz amacına göre farklı matematiksel biçimlerde seçilebilir. Örnekler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Wavelet Fonksiyonları

Dalgacık	Tanım	Özellik
Haar	$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$	Hızlı, ayrık analiz için uygun
Morlet	$\Psi(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t)$	Sürekli, frekans duyarlı
Daubechies (dbN)	$\Psi(t) = \sum_k (-1)^k h_{1-k} \phi(2t - k)$	Kompakt destekli, DWT için ideal
Mexican Hat (Ricker)	$\Psi(t) = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$	Simetrik, enerji yoğun
Coiflet / Symlet	Daubechies'in modifiye edilmiş halidir.	Düşük yan lob, düzgün geçiş

Sürekli wavelet dönüşümü her a, b değeri için hesaplandığından yüksek hesaplama maliyetine sahiptir. Bu nedenle Ayrık Wavelet Dönüşümü (DWT)

geliştirilmiştir. Uygulamada daha yaygın olan DWT, sinyali bir filtre bankası yaklaşımıyla ardışık olarak ikiye ayırır: Yaklaşım katsayıları (düşük frekans) ve Detay katsayıları (yüksek frekans). Bu ayrıştırma, sinyalin logaritmik olarak frekans bantlarına bölünmesini sağlar (*A Wavelet Tour of Signal Processing*, n.d.).

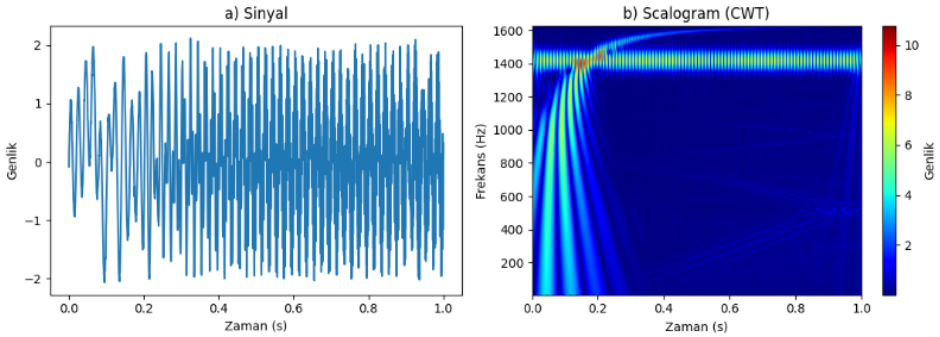
Bir ayrık zamanlı sinyal $x[n]$ için DWT, **ölçekleme** ve **dalgacık** fonksiyonlarına Formül 4.3'te tanımlanmıştır.

$$[n] = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(n) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(n) \quad 4.3$$

Burada:

- $\phi_{j,k}(n)$: ölçekleme fonksiyonları
- $\psi_{j,k}(n)$: dalgacık fonksiyonları
- $a_{j,k}$: yaklaşım katsayıları
- $d_{j,k}$: detay katsayıları

Matematiksel olarak DWT, CWT'nin örneklenmiş biçimidir. Şekil 4.3'te bir **Scalogram örneği verilmiştir. Scalogram, CWT** sonucunda elde edilen **zaman-frekans gösterimidir.**



Şekil 4.3. Scalogram örneği a) zaman alanı sinyali ve b) CWT gösterimi

Şekil 4.3.a'da verilen sinyal, zamanla frekansı değişen karmaşık bir işarettir. Başlangıçta daha düşük frekans bileşenleri baskınken, zaman ilerledikçe sinyalin frekansı artmaktadır. Şekil 4.3.b bu sinyale ait CWT ile elde edilen

scalogramdır. Renk yoğunluğu, belirli bir anda sinyalde baskın olan frekans bileşenlerinin genliğini göstermektedir.

Wavelet dönüşümü; sinyal işleme, güç kalitesi analizi, EEG/EMG verileri, titreşim teşhisi, optik sinyaller, görüntü sıkıştırma ve transient analizlerinde yaygın olarak kullanılır. Aşağıda son yıllarda Wavelet dönüşümü kullanılarak yapılan bazı çalışmalar verilmiştir.

- **“Wavelet-based EEG processing for computer-aided seizure detection and epilepsy diagnosis”** (Faust et al., 2015): Bu çalışma bir derleme makaledir ve EEG / epilepsi tanısı alanında wavelet tekniklerinin genel kullanımını inceler. Wavelet temelli yöntemler, EEG sinyalindeki geçici (transient) olayları (nöbet başlangıcı gibi) tespit etmek için zaman-frekans analizinde kullanılır.
- **“Machine Fault Diagnosis through Vibration Analysis: Continuous Wavelet Transform with Complex Morlet Wavelet and Time–Frequency RGB Image Recognition via CNN”** (Yang et al., 2024): Bu çalışmada titreşim sinyalleri **sürekli wavelet dönüşümü (CWT)** ile zaman-frekans düzlemine çevrilmiş ve elde edilen skalerogramlar (scalogram) RGB görüntülere dönüştürülerek derin öğrenme (CNN) modelleriyle arıza sınıflandırması yapılmıştır.
- **“Continuous Wavelet Transform and CNN for Fault Diagnosis in Gearbox”** (Lupea & Lupea, 2025): Bu çalışmada dişli (gearbox) titreşim sinyalleri CWT ile analiz edilmiş, her üç eksenindeki ivmeölçer verisi için zaman-frekans temsili elde edilmiş ve bu temsiller CNN ile sınıflandırılmıştır.

SONUÇ

Bu bölümde, mühendislikte sinyallerin çok boyutlu karakterini anlamak için kullanılan temel analiz yaklaşımları olan zaman, frekans ve ölçek uzayındaki dönüşümler kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Zaman alanı temsiline, sinyallerin anlık davranışlarını yorumlamada sağladığı avantajlar; frekans alanı dönüşümlerinin sistemlerin spektral yapısını ortaya çıkarma gücü; ölçek analizinin ise aynı sinyalde hem yerel hem de genel değişimleri yakalayabilme esnekliği vurgulanmıştır. Böylece, mühendislikte sıkça karşılaşılan karmaşık sinyal, veri ve sistem problemlerinin tek bir bakış açısı ile çözölemeyeceği;

çoklu dönüşüm stratejilerinin daha bütüncül ve güvenilir sonuçlar sunduğu gösterilmiştir.

Klasik Fourier dönüşümü, doğrusal ve süreklilik gösteren sinyaller için güçlü bir spektral araç olmasına rağmen zaman bilgisini kaybetmesi nedeniyle sınırlıdır. Bu eksiklik, kısa süreli Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü ve ölçek tabanlı yöntemler gibi hibrit analiz tekniklerinin doğmasına yol açmıştır. Böylece mühendislik uygulamalarında geçici olayların, ani bozucuların, gürültünün veya lokal davranışların izlenebilmesi mümkün hale gelmiştir. Özellikle güç sistemleri, haberleşme, biyomedikal sinyal işleme, görüntü analizi ve yapay zekâ tabanlı kestirim çalışmaları, zaman–frekans–ölçek yaklaşımlarının birlikte kullanılmasından büyük kazanımlar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, klasik dönüşümler günümüz mühendisliğinin hâlâ temel yapı taşlarıdır. Ancak sadece bir yöntemle bağlı kalmak, karmaşık sistemlerin analizinde eksik ya da yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle modern mühendislik, dönüşümlerin avantajlarını birleştiren hibrit yöntemlerin kullanımını teşvik etmektedir. Bu bölüm, mühendislikte dönüşüm tabanlı analizlerin prensiplerini, güçlü yönlerini ve sınırlamalarını ortaya koyarak, araştırmacı ve uygulayıcılara daha doğru, güvenilir ve kapsamlı analizler yapabilmeleri için teorik bir çerçeve sunmayı amaçlamıştır.

KAYNAKLAR

- A Wavelet Tour of Signal Processing*. (n.d.). Retrieved 3 November 2025, from https://www.researchgate.net/publication/215659315_A_Wavelet_Tour_of_Signal_Processing
- Brigham, E. O. (1988). The Fast Fourier Transform and Its Applications by E. Oran Brigham. In *Library of Congress Cataloging in Publication Data* (Vol. 12).
- Cai, Y. (1999). Discrete Time Signal Processing Tutorial. *Book*, 1999, 870.
- Cohen, L. (1995). Time Frequency Analysis. *Prentice Hall*, 315. https://books.google.com/books/about/Time_frequency_Analysis.html?i=d=CSKLQgAACAAJ
- Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297. <https://doi.org/10.2307/2003354>
- Durak, L., & Arikian, O. (2003). Short-time Fourier transform: Two fundamental properties and an optimal implementation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(5), 1231–1242. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.810293>
- Ewert, P., Wicher, B., & Pajchrowski, T. (2024). Application of the STFT for Detection of the Rotor Unbalance of a Servo-Drive System with an Elastic Interconnection. *Electronics (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS13020441>
- Faust, O., Acharya, U. R., Adeli, H., & Adeli, A. (2015). Wavelet-based EEG processing for computer-aided seizure detection and epilepsy diagnosis. *Seizure*, 26, 56–64. <https://doi.org/10.1016/J.SEIZURE.2015.01.012>
- Gabor, D. (1946). Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, 93(26), 429–441. <https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0074>
- Gautam, G., Shrestha, S., & Cho, S. (2015). *Spectral Analysis of Rectangular , Hanning , Hamming and Kaiser Window for Digital Fir Filter*. 4(2), 138–144.
- Ghafourian, M. S., Noori, A., Taghipour, S., & Ramezani, A. (2025). Multimodal apnea detection: advancements through convolutional neural networks and STFT analysis of EEG, ECG, and nasal signals to tackle key challenges in innovation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*.
- Gibson, G. A. (1892). On the History of the Fourier Series. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 11, 137–166. <https://doi.org/10.1017/S001309150003131X>
- Jembula, K. K., Srinivasulu, P. G., & Prasad, K. S. (2013). Design Of Electrocardiogram (ECG Or EKG) System On FPGA. *International Journal of Engineering and Science*, 3(2), 21–27.

- Kow, P.-Y., & Kow, P.-Z. (2025). *An efficient light-weighted signal reconstruction method consists of Fast Fourier Transform and Convolutional-based Autoencoder*. <https://arxiv.org/pdf/2501.01650>
- Lupea, I., & Lupea, M. (2025). Continuous Wavelet Transform and CNN for Fault Detection in a Helical Gearbox. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 950, 15(2), 950. <https://doi.org/10.3390/APP15020950>
- Mallat, S. G. (1989). Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L^2(\mathbb{R})$. *Transactions of the American Mathematical Society*, 315(1), 69. <https://doi.org/10.2307/2001373>
- Mandal, M., & Asif, A. (2007). *Continuous and Discrete Time Signals and Systems with CD-ROM*. 865. https://books.google.com/books?id=ShAOrPl_11EC&pgis=1
- Oppenheim, A., Oppenheim, A. V. R. W. ., & Schaffer, R. W. . (2011). *Discrete-Time Signal Processing*. https://books.google.com/books/about/Discrete_Time_Signal_Processing.html?hl=es&id=EaMuAAAAQBAJ
- Osgood, B. (2014). EE261 - Fourier Transform and its applications. *Lecture Notes for EE 261 - The Fourier Transform and Its Applications*, 1–498.
- Owens, F. J., & Murphy, M. S. (1988). A short-time Fourier transform. *Signal Processing*, 14(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(88\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0165-1684(88)90040-0)
- Peng, P., Song, Y., Yang, L., & Wei, H. (2022). Seizure Prediction in EEG Signals Using STFT and Domain Adaptation. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/FNINS.2021.825434>
- Podder, P. (2014). *Comparative Performance Analysis of Hamming , Hanning and Blackman Window*. 96(18), 1–7.
- Pollock, D. S. G. (n.d.). *A Handbook of Time-series Analysis, Signal Processing and Dynamics*.
- Richter, M. M., Paul, S., Këpuska, V., & Silaghi, M. (2022). Fundamentals of Signal Transformations. *Signal Processing and Machine Learning with Applications*, 69–95. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45372-9_3
- Salomon Bochner, K. C. (n.d.). *Fourier Transforms*.
- Schiff, J. L. (n.d.). *The Laplace Transform: Theory and Applications*.
- Smith, S. W. (1997). 07 Properties of Convolution. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 123–140. https://books.google.com/books/about/The_Scientist_and_Engineer_s_Guide_to_Di.html?id=rp2VQgAACAAJ
- Sneddon, I. N. (n.d.). *Fourier Transforms*.
- Sullivan, D. M. (1996). Z-transform theory and the FDTD method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44(1), 28–34. <https://doi.org/10.1109/8.477525>
- van Dronghen, W. (2007). Continuous, Discrete, and Fast Fourier Transform. *Signal Processing for Neuroscientists*, 91–105. <https://doi.org/10.1016/B978-012370867-0/50006-1>

- Wu, C., & Low, M. (2024). FFT-Based Simultaneous Calculations of Very Long Signal Multi-Resolution Spectra for Ultra-Wideband Digital Radio Frequency Receiver and Other Digital Sensor Applications. *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 1207, 24(4), 1207. <https://doi.org/10.3390/S24041207>
- Yang, R., Liu, Z., Sun, L., & Łuczak, D. (2024). Machine Fault Diagnosis through Vibration Analysis: Continuous Wavelet Transform with Complex Morlet Wavelet and Time–Frequency RGB Image Recognition via Convolutional Neural Network. *Electronics* 2024, Vol. 13, Page 452, 13(2), 452. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS13020452>
- Zero-Phase Sound via Giant FFT. (n.d.). Retrieved 31 October 2025, from https://www.researchgate.net/publication/395394263_Zero-Phase_Sound_via_Giant_FFT
- Zhang, D. (2019). *Wavelet Transform*. 35–44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17989-2_3

BÖLÜM 5

MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMLARI

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146408>

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4654-5140 kiremdanaci@sivas.edu.tr Orcid ID: 0000-0002-9148-1481.

GİRİŞ

Malzeme bilimi ve mühendisliği, enerji, savunma, havacılık, elektronik, biyomedikal ve sürdürülebilir teknolojiler gibi pek çok kritik alanda kullanılan yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinde merkezi bir role sahiptir. Ancak yeni bir malzemenin keşfi veya mevcut bir malzemenin belirli bir uygulama için optimize edilmesi, geleneksel olarak uzun süreli deneysel çalışmalar, tekrarlayan deneme-yanılma süreçleri ve yüksek maliyetli karakterizasyon adımları gerektirmektedir. Bu durum, çok bileşenli alaşımlar, fonksiyonel ince filmler, yarıiletken heteroyapılar ve kompozit sistemler gibi karmaşık malzeme sınıflarında daha da belirgin hâle gelmektedir (Behler & Parrinello, 2007; Butler et al., 2018). Bu zorlukların aşılabilmesi amacıyla son yıllarda hesaplamalı malzeme bilimi yaklaşımları yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Yoğunluk fonksiyonel teorisi (Density Functional Theory, DFT), moleküler dinamik (MD) ve birinci ilke (ab initio) tabanlı yöntemler; atomik yapı ile mekanik, elektronik ve optik özellikler arasındaki ilişkilerin anlaşılmasında önemli katkılar sunmuştur. Bununla birlikte, bu yöntemlerin yüksek hesaplama maliyetleri, özellikle geniş parametre uzayına sahip malzeme sistemlerinde yüksek verimli tarama çalışmalarını sınırlandırmaktadır (Jain et al., 2013; Butler et al., 2018).

Bu noktada, büyük veri analizi ve yapay zekâ tabanlı yöntemler, malzeme bilimi alanında yeni bir paradigma değişimine yol açmıştır. Özellikle makine öğrenmesi (machine learning, ML) ve derin öğrenme (deep learning, DL), çok boyutlu ve doğrusal olmayan veri yapılarında gizli örüntülerin ortaya çıkarılmasında güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Derin öğrenme modelleri, insan tarafından tanımlanan sınırlı sayıda özellik yerine, verinin kendisinden çok katmanlı temsiller öğrenebilmekte; bu sayede atomik yapı-özellik ilişkilerinin daha doğru ve genellenebilir biçimde modellenmesine olanak sağlamaktadır (Schütt et al., 2017; Butler et al., 2018).

Son on yılda yapılan çalışmalar, derin öğrenmenin; elastik modül, bant aralığı, oluşum enerjisi, dielektrik sabiti ve optik soğurma gibi çok sayıda malzeme özelliğinin tahmininde klasik regresyon ve geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk sunduğunu göstermektedir (Xie & Grossman, 2018; Jha et al., 2019; Ward et al., 2016). Ayrıca, açık erişimli

büyük malzeme veri tabanlarının (Materials Project, OQMD, AFLOW vb.) yaygınlaşması, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların hızla gelişmesine zemin hazırlamıştır (Jain et al., 2013).

Bu kitap bölümünün amacı, malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılan derin öğrenme yaklaşımlarını kapsamlı bir literatür taraması çerçevesinde ele almak; kullanılan veri temsillerini, mimari yaklaşımları ve hedeflenen malzeme özelliklerini sistematik bir bakış açısıyla incelemektir. Bölüm boyunca uygulamaya yönelik ayrıntılardan ziyade, yöntembilimsel eğilimler, literatürde öne çıkan çalışmalar ve alanın mevcut sınırlamaları vurgulanmaktadır. Bu yönüyle sunulan içerik, hem malzeme bilimi alanında çalışan araştırmacılar hem de yapay zekâ temelli yöntemleri bu alana entegre etmeyi hedefleyen disiplinlerarası çalışmalar için bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

MALZEME BİLİMİNDE VERİ TEMSİLLERİ

Derin öğrenme modellerinin başarısı, büyük ölçüde kullanılan veri temsiline bağlıdır. Malzeme bilimi bağlamında veri; atomik koordinatlar, kristal yapı parametreleri, kimyasal bileşim, mikro yapı görüntüleri veya spektral ölçümler gibi çok farklı biçimlerde elde edilebilmektedir. Atomik seviyede yapılan çalışmalarda, kristal yapıların sayısal olarak temsil edilmesi temel bir zorluktur. Bu amaçla Coulomb matrisleri, atom merkezli simetri fonksiyonları ve yerel çevre tanımlayıcıları yaygın olarak kullanılmıştır. Behler ve Parrinello tarafından önerilen atom merkezli simetri fonksiyonları, özellikle nöral ağ potansiyellerinin geliştirilmesinde önemli bir dönüm noktası olmuştur (Behler & Parrinello, 2007). Bunun yanında, kristal yapıların grafik tabanlı temsilleri de son yıllarda yaygınlık kazanmıştır. Atomların düğüm, bağların ise kenar olarak tanımlandığı bu yaklaşımlar, malzeme yapısının doğal bir temsiliyi sunmaktadır. Bu temsil biçimi, grafik sinir ağlarının (Graph Neural Networks, GNN) gelişimiyle birlikte malzeme bilimine güçlü bir şekilde entegre edilmiştir. Görüntü tabanlı veri temsilleri ise özellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gibi tekniklerden elde edilen mikro yapı görüntülerinin analizinde kullanılmaktadır. Bu tür veriler, evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) için uygun bir giriş formatı sunmaktadır.

DERİN ÖĞRENMENİN TEMEL KAVRAMLARI

DL, çok katmanlı yapay sinir ağları aracılığıyla veriden hiyerarşik ve soyut temsiller öğrenmeyi amaçlayan bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Klasik ML yöntemlerinde model performansı büyük ölçüde insan tarafından tanımlanan özelliklere bağlıyken, DL modelleri bu özellikleri doğrudan ham veriden otomatik olarak çıkarabilmektedir. Bu özellik, karmaşık ve çok boyutlu veri yapılarının yaygın olduğu malzeme bilimi uygulamaları için DL'yi özellikle cazip hâle getirmektedir (Butler et al., 2018). Bir DL modeli temel olarak giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşur. Gizli katmanlar, doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları yardımıyla giriş verisini kademeli olarak daha soyut temsillere dönüştürür. Bu süreç, atomik yapı-özellik ilişkileri gibi karmaşık fiziksel olguların modellenmesine olanak tanır. Malzeme bilimi bağlamında bu katmanlar, atomik çevre bilgisi, bağlanma geometrisi veya mikro yapı desenleri gibi fiziksel olarak anlamlı temsilleri örtük biçimde öğrenebilmektedir (Schütt et al., 2017; Ward et al., 2016).

DL'de yaygın olarak kullanılan ağ türlerinden biri tam bağlantılı sinir ağlarıdır (Fully Connected Neural Networks, FCNN). Bu yapılar, özellikle düşük boyutlu ve özetlenmiş tanımlayıcıların kullanıldığı çalışmalarda tercih edilmektedir. Ancak malzeme verilerinin çoğu yüksek boyutlu ve yapılandırılmış olduğundan, CNN, GNN ve tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Networks, RNN) gibi özel mimariler geliştirilmiştir. Aktivasyon fonksiyonları, sinir ağlarının doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilmesini sağlayan temel bileşenlerdir. ReLU (Rectified Linear Unit), sigmoid ve hiperbolik tanjant (tanh) fonksiyonları, DL modellerinde en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları arasında yer almaktadır. Özellikle ReLU fonksiyonu, gradyan sönümlenmesi problemini azaltması nedeniyle derin ağlarda yaygın biçimde tercih edilmektedir (Butler et al., 2018).

DL modellerinin eğitimi, geri yayılım (backpropagation) algoritması ve gradyan inişi tabanlı optimizasyon yöntemleri ile gerçekleştirilir. Stokastik gradyan inişi (SGD), Adam ve RMSprop gibi optimizasyon algoritmaları, büyük veri setleri üzerinde etkin öğrenme sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu optimizasyon süreçleri, malzeme veri setlerinin genellikle heterojen ve gürültülü yapısı göz önüne alındığında kritik öneme sahiptir (Ward

et al., 2016). Aşırı öğrenme (overfitting), DL modellerinin önemli sınırlamalarından biridir ve özellikle sınırlı veri setlerinin bulunduğu malzeme bilimi uygulamalarında sıkça karşılaşılan bir problemdir. Bu sorunu azaltmak için düzenleştirme (regularization), dropout, erken durdurma (early stopping) ve veri artırma (data augmentation) gibi teknikler kullanılmaktadır. Literatürde, bu yöntemlerin malzeme özellik tahmininde model genellemesini önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir (Ward et al., 2016).

Son yıllarda derin öğrenme modellerinin fiziksel anlamlandırılabilirliği (interpretability) önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Kara kutu (black-box) olarak nitelendirilen modellerin karar mekanizmalarının açıklanabilmesi, malzeme bilimi açısından yalnızca tahmin doğruluğu değil, aynı zamanda fiziksel içgörü elde edilmesi bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda dikkat mekanizmaları (attention mechanisms), özellik önem analizi ve fizik bilgisiyle zenginleştirilmiş (physics-informed) sinir ağları gibi yaklaşımlar literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır (Chen et al., 2019). Bu temel kavramlar çerçevesinde DL, atomik ölçekten mikro yapıya kadar farklı uzunluk ölçeklerinde malzeme özelliklerinin tahmininde güçlü ve esnek bir araç olarak konumlanmaktadır.

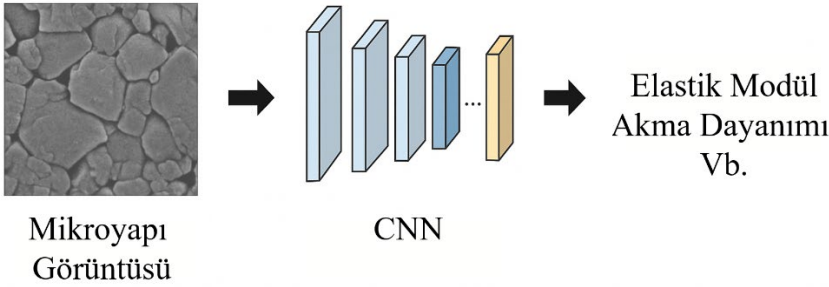
LİTERATÜR TARAMASI

Evrişimli Sinir Ağları ile Malzeme Özellik Tahmini

CNN, uzamsal olarak yerel korelasyonların baskın olduğu veri tipleri için geliştirilmiş DL mimarileridir. Malzeme biliminde CNN'lerin kullanımı, özellikle mikro yapı-özellik ilişkilerinin modellenmesinde önemli bir paradigma değişimi yaratmıştır. Geleneksel yaklaşımlarda tane boyutu, faz oranı veya porozite gibi özellikler manuel olarak çıkarılırken, CNN tabanlı modeller bu özellikleri doğrudan ham görüntüler üzerinden otomatik olarak öğrenebilmektedir.

DeCost ve Holm'un öncü çalışmasında, SEM görüntülerinden elde edilen mikro yapı verileri kullanılarak farklı çelik fazları başarıyla sınıflandırılmıştır (DeCost & Holm, 2015). Bu çalışma, bilgisayarla görü yöntemlerinin metalurjik analizlerde insan uzmanlığına yakın doğruluk sağlayabileceğini

göstermiştir. Benzer şekilde, Azimi ve arkadaşları, çelik mikro yapılarından akma dayanımı ve sertlik tahmini için CNN tabanlı regresyon modelleri geliştirmiştir (Azimi et al., 2018). CNN'ler yalnızca 2B görüntülerle sınırlı değildir. Lubbers ve arkadaşları tarafından önerilen voxel tabanlı 3B temsiller, atomik yapıların üç boyutlu uzayda CNN'ler aracılığıyla öğrenilmesine olanak tanımıştır (Lubbers et al., 2018). Bu yaklaşım, özellikle amorf yapılar ve kusurlu kristaller için avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmalar, görüntü tabanlı derin öğrenme yaklaşımlarının, insan uzmanlığına dayalı manuel özellik çıkarımına olan ihtiyacı önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Örnek bir akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



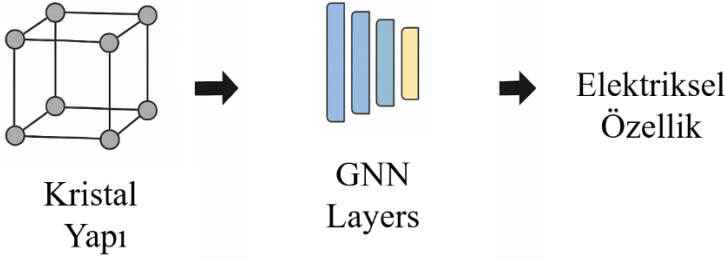
Şekil 1: SEM/TEM mikro yapı görüntüsü, CNN katmanları ve tahmin edilen mekanik özellik (elastik modül, akma dayanımı vb.) akış diyagramı.

Grafik Sinir Ağları ve Kristal Yapılar

GNN, düğümler ve kenarlar arasındaki ilişkileri öğrenmeye dayalı mimariler olup, kristal yapıların atomik bağlanma doğasına son derece uygundur. Atomların düğüm, atomlar arası bağların veya komşuluk ilişkilerinin kenar olarak tanımlandığı bu yapı, kristal simetri ve yerel çevre bilgisinin korunmasını sağlar.

Xie ve Grossman tarafından geliştirilen Crystal Graph Convolutional Neural Network (CGCNN), bu alandaki en etkili çalışmalardan biridir (Xie & Grossman, 2018). CGCNN modeli; oluşum enerjisi, bant aralığı ve elastik modüller gibi özellikleri Materials Project veri tabanı üzerinde yüksek doğrulukla tahmin etmiştir. Bu yaklaşımın önemli avantajlarından biri, atomik çevrelerin öğrenilebilir vektör temsillerine dönüştürülmesidir. SchNet mimarisi

ise sürekli filtre evrişimleri kullanarak atomlar arası etkileşimleri mesafeye bağlı olarak modellemektedir (Schütt et al., 2017). SchNet, özellikle kuantum kimyasal özelliklerin (toplam enerji, kuvvetler, dipol momentler) tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha sonra geliştirilen DimeNet ve MEGNet gibi modeller, açısıl bilgi ve çoklu etkileşim seviyelerini de öğrenme sürecine dahil etmiştir (Klicpera et al., 2020; Chen et al., 2019). Örnek bir akış diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Kristal yapı, GNN katmanları ve tahmin edilen elektronik özellik akış şeması.

Derin Öğrenme ile Mekanik Özelliklerin Tahmini

Mekanik özellikler; elastik modül, Poisson oranı, akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik ve kırılma tokluğu gibi parametreleri kapsamakta olup, bir malzemenin yapısal uygulamadaki performansını doğrudan belirlemektedir. Bu özelliklerin güvenilir biçimde tahmin edilmesi, özellikle havacılık, otomotiv, savunma ve enerji sektörlerinde kritik öneme sahiptir. Ancak geleneksel mekanik karakterizasyon yöntemleri, yüksek maliyet, numune hazırlama zorlukları ve uzun test süreleri nedeniyle sınırlayıcı olabilmektedir (Ward et al., 2016; Butler et al., 2018). DL tabanlı yaklaşımlar, atomik yapıdan mikro yapıya kadar farklı uzunluk ölçeklerinde elde edilen verileri kullanarak mekanik özelliklerin tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. İlk çalışmalarda, kristal yapı tanımlayıcıları ve kimyasal bileşim bilgileri, tam bağlantılı derin sinir ağları ile birleştirilerek elastik sabitlerin ve modüllerin tahmini gerçekleştirilmiştir. Liu ve arkadaşları, bu yaklaşımı kullanarak çeşitli inorganik malzemeler için elastik sabitleri yüksek doğrulukla tahmin etmiş ve

sonuçların DFT hesaplamalarıyla uyumlu olduğunu göstermiştir (Liu et al., 2018).

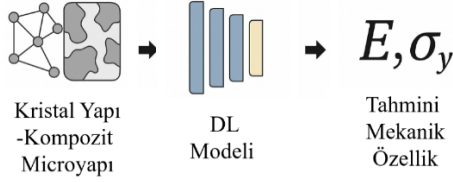
Ward ve arkadaşları tarafından geliştirilen genel amaçlı ML çerçevesi, geniş bir tanımlayıcı kümesi ile mekanik özelliklerin tahmininde DL'nin etkinliğini ortaya koymuştur (Ward et al., 2016). Bu çalışma, özellikle farklı kristal sistemleri arasında genelleme yeteneğinin önemine dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, Isayev ve arkadaşları, kristal yapıların otomatik olarak öğrenilen temsillerini kullanarak elastik modül ve sertlik tahmini gerçekleştirmiştir (Isayev et al., 2017).

Mikro yapı tabanlı yaklaşımlar, özellikle polikristal ve kompozit malzemeler için ön plana çıkmaktadır. CNN tabanlı modeller, SEM ve EBSD görüntülerinden tane boyutu, yönelim dağılımı ve faz morfolojisi gibi bilgileri örtük olarak öğrenerek efektif mekanik özelliklerin tahmininde kullanılmaktadır. Yang ve arkadaşları, CNN kullanarak polikristal mikro yapı görüntülerinden elastik özellik tahmini yapmış ve klasik homogenizasyon yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk elde etmiştir (Yang et al., 2018).

Kompozit malzemelerde DL uygulamaları, çok fazlı ve heterojen yapıların modellenmesi açısından özel bir önem taşımaktadır. Cang ve arkadaşları, mikro yapı görüntülerini girdi olarak kullanan derin sinir ağları ile kompozit malzemelerin elastik modülünü başarıyla tahmin etmiştir (Cang et al., 2017). Bu tür çalışmalar, lif takviyeli polimerler ve seramik matrisli kompozitler gibi karmaşık sistemlerde derin öğrenmenin potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Son yıllarda, GNN'nin mekanik özellik tahminine entegrasyonu da dikkat çekmektedir. GNN tabanlı modeller, atomlar arası bağlanma ve yerel çevre bilgisini doğrudan dikkate alarak elastik modüller ve kırılma enerjisi gibi özelliklerin tahmininde kullanılmaktadır. Chen ve arkadaşları tarafından geliştirilen MEGNet mimarisi, hem mekanik hem de termodinamik özelliklerin tahmininde başarılı sonuçlar sunmuştur (Chen et al., 2019). Bununla birlikte, mekanik özellik tahmininde belirsizlik analizi ve model güvenilirliği önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. DL modellerinin deneysel verilerle doğrulanması, tahmin edilen değerlerin fiziksel olarak anlamlı sınırlar içerisinde kalmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda,

belirsizlik tahmini ve fizik tabanlı kısıtların modele entegre edilmesi, literatürde giderek artan bir ilgi görmektedir (Butler et al., 2018). Örnek bir akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



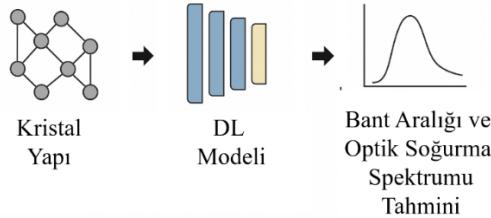
Şekil 3: Kristal yapı/kompozit mikro yapı, DL modeli ve tahmin edilen mekanik özellikler (E, σ_y) için akış şeması.

Elektronik ve Optik Özelliklerin Tahmini

Elektronik ve optik özellikler; bant aralığı, dielektrik sabiti, taşıyıcı hareketliliği ve optik soğurma katsayısı gibi parametreleri içermektedir. Bu özellikler, yarıiletkenler, fotodedektörler ve optoelektronik aygıtlar için kritik öneme sahiptir.

Jha ve arkadaşları, Materials Project ve deneysel veri setlerini birleştirerek derin transfer öğrenme tabanlı bant aralığı tahmini gerçekleştirmiştir (Jha et al., 2019). Bu yaklaşım, sınırlı deneysel verinin bulunduğu durumlarda model genellemesini önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Butler ve arkadaşlarının çalışması, DL'nin yüksek verimli malzeme taraması (high-throughput screening) süreçlerinde nasıl kullanılabileceğini göstermektedir (Xie & Grossman, 2018). Optik özellikler özelinde, CNN ve GNN tabanlı modeller; absorpsiyon spektrumları ve kırılma indisi tahmininde başarıyla uygulanmıştır. Örnek bir akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: Kristal yapı, DL modeli ve bant aralığı ve optik soğurma spektrumu tahmini için akış şeması.

Bant aralığı, taşıyıcı hareketliliği ve optik soğurma katsayısı gibi özellikler, yarıiletken ve optoelektronik malzemeler için kritik parametrelerdir. DL modelleri, büyük malzeme veri tabanları üzerinde eğitilerek bu özelliklerin hızlı bir şekilde öngörülmesini mümkün kılmaktadır.

Tablo 1’de, malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılan başlıca derin öğrenme yaklaşımlarını; kullanılan veri türü, model mimarisi, hedeflenen özellikler ve referanslar açısından özetlemektedir. Bu tablo, literatürdeki eğilimleri ve baskın metodolojileri bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu tablo incelendiğinde, son yıllarda grafik sinir ağlarının kristal ve moleküler sistemlerde baskın bir yaklaşım hâline geldiği; görüntü tabanlı CNN modellerinin ise özellikle mikro yapı–mekanik özellik ilişkilendirmelerinde öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca, transfer öğrenme ve çoklu veri kaynağı entegrasyonu, sınırlı veri probleminin aşılmasında önemli bir eğilim olarak dikkat çekmektedir.

Tablo 1: Malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılan derin öğrenme yaklaşımlarının literatür özeti

Çalışma	Veri Türü	Malzeme Sınıfı	Derin Öğrenme Mimarisi	Tahmin Edilen Özellik(ler)	Veri Kaynağı
Behler & Parrinello (2007)	Atomik koordinatlar	Genel atomistik sistemler	Atom-merkezli YSA	Potansiyel enerji yüzeyleri	DFT simülasyonları
DeCost & Holm (2015)	SEM görüntüleri	Metalik alaşımlar	CNN	Faz sınıflandırması	Deneysel mikro yapı
Azimi et al. (2018)	SEM görüntüleri	Çelikler	CNN	Akma dayanımı, sertlik	Deneysel veri
Lubbers et al. (2018)	3B voxel atomik yapı	Moleküller / katılar	3B CNN	Toplam enerji	DFT veri setleri
Xie & Grossman (2018)	Kristal grafik yapısı	İnorganik kristaller	CGCNN (GNN)	Bant aralığı, oluşum enerjisi, elastik modül	Materials Project
Schütt et al. (2017)	Atomik çevre tanımlayıcıları	Moleküller / kristaller	SchNet (GNN)	Enerji, kuvvetler, dipol moment	QM9, DFT
Chen et al. (2019)	Kristal grafik yapısı	İnorganik kristaller	MEGNet (GNN)	Termodinamik ve elektronik özellikler	Materials Project
Klicpera et al. (2020)	Grafik + açılabilir bilgi	Moleküller / kristaller	DimeNet (GNN)	Enerji ve bant yapısı	DFT tabanlı veri
Liu et al. (2018)	Kristal tanımlayıcılar	Yapısal malzemeler	Derin YSA	Elastik sabitler	Hesaplamalı veri
Ward et al. (2016)	Kimyasal ve yapısal tanımlayıcılar	İnorganik malzemeler	Derin öğrenme	Mekanik özellikler	OQMD
Jha et al. (2019)	Hesaplamalı + deneysel veri	Yarıiletkenler	Transfer learning	Bant aralığı	Materials Project + deneysel
Butler et al. (2018)	Çoklu veri temsilleri	Çeşitli malzemeler	Derin öğrenme (review)	Çoklu özellikler	Açık veri tabanları

VERİ TABANLARI VE AÇIK KAYNAK KAYNAKLAR

Derin öğrenme uygulamalarının başarısı, büyük ve güvenilir veri tabanlarının varlığına bağlıdır. Materials Project, Open Quantum Materials Database (OQMD) ve AFLOW gibi açık erişimli veri tabanları, binlerce malzeme için hesaplanmış özellikler sunmaktadır. Bu veri tabanları, derin öğrenme modellerinin eğitilmesi ve doğrulanması için temel kaynaklar olarak kullanılmaktadır.

ZORLUKLAR, SINIRLAMALAR VE AÇIK ARAŞTIRMA PROBLEMLERİ

Derin öğrenme yaklaşımları, malzeme özelliklerinin tahmininde önemli doğruluk artışları sağlamış olsa da, bu yöntemlerin güvenilirliği, genellenebilirliği ve endüstriyel uygulanabilirliği açısından çözülmesi gereken çeşitli temel problemler bulunmaktadır. Bu zorluklar; veri temelli sınırlamalar, modelleme sorunları, fiziksel tutarlılık ve uygulamaya aktarım başlıkları altında ele alınabilir.

Kısıtları ve Veri Kalitesi Problemleri

Derin öğrenme modellerinin performansı doğrudan kullanılan veri setlerinin kalitesine, kapsamına ve temsil gücüne bağlıdır. Malzeme bilimi alanında birçok mekanik, elektronik ve optik özellik için deneysel veri son derece sınırlıdır. Mevcut büyük veri tabanları (Materials Project, OQMD, AFLOW) çoğunlukla DFT tabanlı hesaplamalara dayanmaktadır ve idealize edilmiş koşulları temsil etmektedir. Bu durum, gerçek üretim koşulları ile model tahminleri arasında sapmalara neden olabilmektedir. Buna ek olarak, farklı veri kaynakları arasında; hesaplama parametreleri, ölçüm koşulları, numune hazırlama yöntemleri gibi unsurlar açısından ciddi tutarsızlıklar bulunmaktadır. Bu heterojenlik, derin öğrenme modellerinin genelleme yeteneğini sınırlayan önemli bir faktördür.

Model Genellemesi ve Aşırı Öğrenme (Overfitting)

Birçok derin öğrenme modeli, yalnızca eğitildiği malzeme sınıfı veya kimyasal uzay içerisinde yüksek doğruluk göstermekte; farklı kristal sistemler, yeni bileşimler veya kusurlu yapılar söz konusu olduğunda performans kaybı

yaşayabilmektedir. Bu durum, özellikle küçük ve dar kapsamlı veri setleriyle eğitilen modellerde aşırı öğrenme problemine yol açmaktadır. Transfer öğrenme, aktif öğrenme ve veri artırma stratejileri bu sorunu azaltmaya yönelik çözümler sunsa da, gerçek anlamda genellenebilir modellerin geliştirilmesi hâlen açık bir araştırma alanıdır.

Yorumlanabilirlik ve Fiziksel Anlamlandırma

Derin öğrenme modellerinin çoğu “kara kutu” olarak nitelendirilmekte ve tahminlerin arkasındaki fiziksel gerekçeler açık biçimde ortaya konamamaktadır. Oysa malzeme bilimi açısından yalnızca doğru tahmin değil, aynı zamanda fiziksel içgörü elde edilmesi de kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda; açıklanabilir yapay zekâ (Explainable AI, XAI), attention mekanizmaları, özellik önem analizi (SHAP, feature attribution), Physics-informed neural networks (PINN) gibi yaklaşımlar, model çıktılarının fiziksel olarak yorumlanabilir hâle getirilmesi açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Ölçeklenebilirlik ve Hesaplama Maliyeti

Derin ve karmaşık ağ mimarileri (özellikle büyük ölçekli GNN’ler ve 3B CNN’ler), yüksek hesaplama gücü ve bellek gereksinimi doğurmaktadır. Bu durum, derin öğrenme tabanlı yöntemlerin her araştırma grubu veya endüstriyel ortamda kolayca uygulanabilmesini zorlaştırmaktadır. Model karmaşıklığı ile hesaplama maliyeti arasında denge kurulması, bu alandaki önemli mühendislik problemlerinden biridir.

Deneyisel Doğrulama ve Uygulamaya Aktarım

Literatürdeki birçok çalışma, derin öğrenme modellerinin başarısını yalnızca hesaplamalı doğrulamalar üzerinden raporlamaktadır. Ancak endüstriyel uygulamalar açısından deneyisel doğrulama vazgeçilmezdir. Model çıktılarının deneyisel geri besleme ile sürekli güncellendiği kapalı döngü sistemlerin geliştirilmesi, derin öğrenmenin malzeme keşfinde gerçek bir dönüştürücü teknoloji hâline gelmesi açısından kritik öneme sahiptir.

SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Bu kitap bölümünde, malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılan derin öğrenme yaklaşımları kapsamlı bir literatür taraması çerçevesinde ele alınmıştır. İncelenen çalışmalar, derin öğrenmenin atomik, kristal ve mikro yapı ölçeklerinde malzeme özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini; özellikle mekanik, elektronik ve optik özellikler açısından klasik hesaplamalı yöntemlere güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Literatür, evrimsel sinir ağlarının mikro yapı temelli mekanik analizlerde; grafik sinir ağlarının ise kristal ve moleküler sistemlerde baskın yaklaşımlar hâline geldiğini göstermektedir. Transfer öğrenme ve çoklu veri kaynağı entegrasyonu, sınırlı veri probleminin aşılmasında öne çıkan stratejiler olarak dikkat çekmektedir.

Gelecek perspektifi açısından derin öğrenmenin malzeme bilimiyle entegrasyonunun üç temel ekseninde ilerlemesi beklenmektedir:

- 1.Fizik tabanlı kısıtların ve alan bilgisinin derin öğrenme modellerine doğrudan entegre edilmesi
- 2.Açıklanabilir yapay zeka yaklaşımlarıyla model çıktılarının fiziksel olarak yorumlanabilir hâle getirilmesi
- 3.Deneysel-hesaplamalı-yapay zeka tabanlı kapalı döngü sistemlerle otonom malzeme keşfinin mümkün kılınması

Sonuç olarak, derin öğrenme yaklaşımları yalnızca mevcut malzemelerin özelliklerini tahmin eden araçlar olmaktan çıkmakta; yeni nesil malzemelerin keşfi, tasarımı ve optimizasyonunda yönlendirici bir rol üstlenmektedir. Önümüzdeki yıllarda bu metodolojilerin olgunlaşmasıyla birlikte, malzeme bilimi ve mühendisliğinde daha hızlı, daha güvenilir ve daha sürdürülebilir inovasyonların gerçekleşmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Azimi, S. M., Britz, D., Engstler, M., Fritz, M., & Mücklich, F. (2018). Advanced steel microstructural classification by deep learning methods. *Scientific Reports*, 8, 2128. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20037-5>
- Behler, J., & Parrinello, M. (2007). Generalized neural-network representation of high-dimensional potential-energy surfaces. *Physical Review Letters*, 98(14), 146401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.146401>
- Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559(7715), 547–555. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2>
- Chen, C., Ye, W., Zuo, Y., Zheng, C., & Ong, S. P. (2019). Graph networks as a universal machine learning framework for molecules and crystals. *Chemistry of Materials*, 31(9), 3564–3572. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b01294>
- DeCost, B. L., & Holm, E. A. (2015). A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data. *Computational Materials Science*, 110, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.08.034>
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., Cholia, S., Gunter, D., Skinner, D., Ceder, G., & Persson, K. A. (2013). The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL Materials*, 1(1), 011002. <https://doi.org/10.1063/1.4812323>
- Jha, D., Ward, L., Paul, A., Liao, W. K., Choudhary, A., Wolverton, C., & Agrawal, A. (2019). Enhancing materials property prediction by leveraging computational and experimental data using deep transfer learning. *Nature Communications*, 10, 5316. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13297-1>
- Klicpera, J., Groß, J., & Günnemann, S. (2020). Directional message passing for molecular graphs. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. <https://arxiv.org/abs/2003.03123>
- Liu, Z., Zhou, Y., Yang, Y., Li, J., & Xue, D. (2018). Predicting elastic properties of materials using deep learning. *Materials & Design*, 160, 862–872. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.012>
- Lubbers, N., Smith, J. S., & Barros, K. (2018). Hierarchical modeling of molecular energies using a deep neural network. *The Journal of Chemical Physics*, 148(24), 241715. <https://doi.org/10.1063/1.5011181>
- Schütt, K. T., Sauceda, H. E., Kindermans, P. J., Tkatchenko, A., & Müller, K. R. (2017). SchNet: A continuous-filter convolutional neural network for modeling quantum interactions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 992–1002.
- Ward, L., Agrawal, A., Choudhary, A., & Wolverton, C. (2016). A general-purpose machine learning framework for predicting properties of

inorganic materials. npj Computational Materials, 2, 16028.
<https://doi.org/10.1038/npjcompumats.2016.28>

Xie, T., & Grossman, J. C. (2018). Crystal graph convolutional neural networks for an accurate and interpretable prediction of material properties. Physical Review Letters, 120(14), 145301.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120>

BÖLÜM 6

KENTSEL VE ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE SU VERİMLİLİĞİ

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146437>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. sayildiz@cumhuriyet.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-3382-2487,

GİRİŞ

Artan nüfusla birlikte kentleşme ve sanayileşme süreçleri, su kaynakları üzerindeki etkiyi her geçen gün daha da artırmaktadır. Arz ile talep arasındaki dengenin bozulması, sadece su kıtlığı yaşayan bölgeleri etkilemekle kalmayıp su potansiyeli yüksek ülkelerde dahi suyun daha verimli ve etkin biçimde yönetilmesini zorunlu hale getirmiştir. “Su verimliliği” kavramı, bilinen su tasarrufu yaklaşımının ötesinde suyun nasıl kullanıldığı ve yeniden kazanımına odaklanan bütüncül bir mühendislik yaklaşımı olarak ön plana çıkmaktadır.

Su verimliliği, genel anlamıyla belirli bir üretim veya hizmetin en az su girdisi ile sağlanabilmesini ifade etmektedir. Burada, yalnızca mutlak su tüketimini azaltmak değil, su kullanımının sistem performansı ile ilişkilendirilmesini amaçlamaktadır. Bu yönüyle su verimliliği, özellikle kentsel altyapı sistemleri ve endüstriyel üretim süreçlerinde ölçülebilir göstergeler aracılığıyla değerlendirilmesi gereken teknik bir kavramdır. Su sektöründe verimlilik kavramının, işletme etkinliği ve kaynak kullanımıyla birlikte ele alınması gerekmektedir. Su yönetiminde yalnızca arz odaklı çözümler uzun vadede yeterli olmamaktadır (Abbott ve Cohen, 2009).

Su verimliliği kentsel sistemler açısından değerlendirildiğinde; içme suyu temini, dağıtım şebekeleri, atıksu toplama ve arıtma sistemleri ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle dağıtım şebekelerinde meydana gelen fiziksel kayıplar, su verimliliğini sınırlayan unsurların başında gelir. Kentsel ölçekte suyun etkin yönetimi, yalnızca teknik altyapının iyileştirilmesini değil, aynı zamanda performans göstergeleri ile sistemin sürekli izlenmesini ve değerlendirilmesini gerektirmektedir. Türkiye özelinde yapılan su ayak izi çalışmaları, kentsel ve endüstriyel su kullanımının toplam su talebi içerisindeki payının giderek arttığını göstermektedir (Turan, 2017).

Endüstriyel sistemlerde su verimliliği ise üretim süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle çok boyutlu analiz yöntemleri ile ele alınmaktadır. Sanayi tesislerinde su; soğutma, yıkama ve yardımcı prosesler gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Endüstriyel sistemlerde su kullanım verimliliği, su tüketimi ile kirlenici yüklerin azaltım maliyetlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir (Wang ve ark. 2015).

Son yıllarda özellikle Çin gibi hızlı sanayileşen ülkelerde yapılan çalışmalar, kentsel ve endüstriyel su verimliliğinin ölçümünde teknik etkinlik analizlerinin yaygınlaştığını göstermektedir. Liang ve Zhou (2022), Çin kentlerindeki endüstriyel su kullanımını teknik etkinlik çerçevesinde ele alarak, şehirlerarasında önemli farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde Liu ve arkadaşları (2019), kentleşme sürecinin endüstriyel su tüketim verimliliği üzerindeki etkisini incelemiş ve plansız kentleşmenin su verimliliğini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermiştir. Su verimliliği yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda sistem tasarımı ve yönetim kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir.

Türkiye’de su verimliliği konusundaki çalışmaların önemli bir bölümü tarımsal sulama sistemlerine odaklanmış olmakla birlikte, arazi-su verimliliği analizleri suyun etkin kullanımına ilişkin değerli metodolojik yaklaşımlar sunmaktadır. Su temini ve arazi verimliliği arasındaki ilişki su yönetiminde belirleyici bir unsurdur (Akkuzu ve Mengü, 2011). Öte yandan, su verimliliği kavramı giderek daha fazla döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği yaklaşımları ile birlikte ele alınmaktadır. Türkiye’de sıfır atık yaklaşımı çerçevesinde yapılan değerlendirmeler, kaynakların bütüncül yönetiminin su verimliliğini de doğrudan etkilediğini göstermektedir (Yücetürk ve Alkan, 2024). Bu bağlamda su verimliliği, yalnızca su miktarına odaklanan dar bir çerçeve yerine, sistem performansını esas alan çok boyutlu bir değerlendirme alanı olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışma, kentsel ve endüstriyel sistemlerde su verimliliğini; ölçütler, teknolojik yaklaşımlar ve performans temelli değerlendirme çerçeveleri üzerinden ele almayı amaçlamaktadır. Bölüm kapsamında, su verimliliğinin kavramsal temelleri ortaya konularak, yaygın kullanılan göstergeler değerlendirilerek kentsel ile endüstriyel uygulamalardaki güncel teknolojik yaklaşımlar incelenmiştir. Böylece su verimliliğinin, sürdürülebilir su yönetimi hedefleri doğrultusunda mühendislik temelli, ölçülebilir ve uygulanabilir bir araç olarak nasıl kullanılabileceği ortaya konmaktadır.

SU VERİMLİLİĞİNİN KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ

Su verimliliği kavramının mühendislik sistemleri açısında ele alınabilmesi, öncelikle bu kavramın hangi sistem sınırları, hangi girdiler ve hangi çıktılar çerçevesinde tanımlandığının netleştirilmesini gerektirmektedir. Literatürde su verimliliği; tarımsal, kentsel ve endüstriyel sistemlerde farklı ölçeklerde ve farklı amaçlar doğrultusunda ele alınmıştır. Su verimliliği, mutlak su tüketiminden ziyade, su kullanımının sistem performansı ile ilişkilendirildiği görelili bir değerlendirme alanı sunmaktadır.

Su Verimliliğinin Kavramsal Tanımı ve Temel Yaklaşımlar

Su verimliliği, belirli bir üretim veya hizmetin maksimum şekilde elde edilmesi sürecinde kullanılan su miktarı olarak ifade edilebilir. Ancak bu tanım, farklı uygulama alanları için farklı biçimlerde genişletilebilir. Su verimliliği, yalnızca suyun azaltılmasını değil, aynı zamanda süreçlerin yeniden tasarlanmasını ve suyun sistem içerisindeki dolaşımının optimize edilmesini de içermektedir (Sachidananda ve ark. 2016). Bunun yanı sıra endüstriyel ve kentsel sistemlerde su verimliliğinin değerlendirilmesi yalnızca su tüketimi üzerinden değil aynı zamanda çevresel etkinlik ve kirlilik boyutunun da değerlendirilmesi gerekmektedir (Zhang ve ark. 2018).

Su Verimliliğinde Ölçek Kavramı

Su verimliliğinde kavramsal çerçeve belirlenirken sistem sınırlarının doğru tanımlanması önemli bir unsurdur. Su verimliliği ile ilgili yapılan çalışmalar, farklı mekânsal ve zamansal ölçeklerde anlamlı sonuçlar üretilebileceğini göstermiştir. Bouman (2007), tarımsal sistemler için yapmış olduğu çalışmada su verimliliğinin parsel, işletme, havza ve bölgesel ölçeklerde farklı dinamikler sergilediğini belirlemiştir. Moore ve arkadaşları (2011) ise, farklı ölçeklerde değerlendirilen su kullanım verimliliğinin alınacak yönetim kararlarını doğrudan etkilediğini belirtmiştir. Benzer durum, kentsel ve endüstriyel sistemler için de geçerlidir. Bir endüstriyel tesis için yüksek su verimliliği değerleri elde edilirken, aynı tesisin yer aldığı kentsel veya bölgesel sistemde su verimliliğinin düşük olması mümkündür. Bu durum, sistem sınırlarının genişletilmesiyle birlikte suyun yeniden kullanım potansiyeli ve su kayıpları

gibi etkileşimlerin daha görünür hâle gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı gelişmekte olan ülkelerde su verimliliğinin değerlendirmesinde, kentsel ve endüstriyel sistemlerin birlikte değerlendirilmesi önem arz etmektedir (Bai ve ark. 2017).

Kentsel ve Endüstriyel Sistemlerde Su Verimliliği Çerçevesi

Kentsel sistemlerde su verimliliği, ağırlıklı olarak su temini, dağıtım ve kullanım süreçlerine odaklanırken; endüstriyel sistemlerde üretim süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle daha çok süreç entegrasyonu ve geri kazanım stratejileri ön plana çıkmaktadır. Bindra ve arkadaşları (2003), sanayileşme sürecindeki ülkelerde su verimliliğinin, ekonomik kalkınma hedefleri ile uyumlu biçimde ele alınması gerektiğini vurgulamış ve suyun endüstriyel gelişim üzerindeki sınırlayıcı etkisine dikkat çekmiştir. Bu bağlamda su verimliliği, yalnızca çevresel bir hedef değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğin de temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Kentsel ve endüstriyel sistemlerin bütünleşik biçimde ele alınması, su verimliliği kavramının daha işlevsel hâle gelmesini sağlamaktadır. Kentsel alanlarda ortaya çıkan atıksuların endüstriyel süreçlerde yeniden kullanılması, hem toplam su talebini azaltmakta hem de suyun sistem içindeki döngüselliğini artırmaktadır. Bu tür yaklaşımlar, su verimliliğini statik bir oran olmaktan çıkararak, dinamik bir sistem performans göstergesi hâline getirmektedir.

Performans Temelli Su Verimliliği Yaklaşımları

Su verimliliğinin kavramsal çerçevesinde giderek daha fazla benimsenen bir diğer yaklaşım, performans temelli değerlendirme modelleridir. Bu modellerde su verimliliği, belirli göstergeler aracılığıyla ölçülmekte ve zaman içerisinde sistem performansındaki değişimler izlenebilmektedir. Zhang ve arkadaşları (2018), dinamik etkinlik analizlerinin, su verimliliğinin zamana bağlı değişimini ortaya koymada önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir. Bu tür yaklaşımlar, özellikle kentsel ve endüstriyel sistemlerde uygulanan politika ve teknolojilerin etkinliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

SU VERİMLİLİĞİ İÇİN ÖLÇÜTLER VE GÖSTERGELER

Kentsel ve endüstriyel sistemlerde su verimliliğinin değerlendirilebilmesi, kullanılan metrik ve göstergelerin kavramsal olarak doğru tanımlanmasına ve sistem özelliklerini yansıtacak biçimde seçilmesine bağlıdır. Literatürde su verimliliği çoğu zaman tek bir oran veya gösterge üzerinden ifade edilse de, bu yaklaşımın sistem performansını tam olarak yansıtmadığı yönünde güçlü eleştiriler bulunmaktadır (Abbott & Cohen, 2009; Fekete & Stakhiv, 2014). Bu nedenle su verimliliği göstergeleri, teknik, ekonomik ve çevresel boyutları birlikte ele alan çok boyutlu bir değerlendirme çerçevesi içinde ele alınmalıdır.

Verimlilik, Etkinlik ve Etkililik Kavramlarının Göstergelerle İlişkisi

Su verimliliği göstergelerinin doğru yorumlanabilmesi için verimlilik, etkinlik ve etkililik kavramları arasındaki ayrımın netleştirilmesi gerekmektedir. Yükçü ve Atağan (2009), bu kavramların literatürde sıklıkla birbirinin yerine kullanıldığını ve performans analizlerinde metodolojik hatalara yol açtığını belirtmiştir. Verimlilik, belirli bir çıktı için kullanılan su girdisinin oranını ifade ederken; etkinlik, belirlenen hedeflere ne ölçüde ulaşıldığını, etkililik ise elde edilen sonuçların sistem üzerindeki gerçek etkisini tanımlamaktadır. Su verimliliği göstergeleri çoğunlukla verimlilik boyutuna odaklanmakta, ancak tek başına bu yaklaşım sistem performansının bütününe yansıtmamaktadır (Fekete & Stakhiv, 2014).

Geleneksel Su Verimliliği Göstergeleri

Endüstriyel sistemlerde su verimliliğinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan göstergeler, birim üretim başına su tüketimini esas alan oran temelli metriklerdir. Bindra ve arkadaşları (2003), sanayi sektöründe su kullanım verimliliğinin bu tür göstergeler aracılığıyla izlenmesinin, sektörel karşılaştırmalar açısından pratik bir yaklaşım sunduğunu ifade etmiştir. Benzer şekilde Sachidananda ve arkadaşları (2016), imalat sanayii için geliştirdikleri kavramsal çerçevede, su kullanım verimliliğini üretim çıktısı ile toplam su girdisi arasındaki ilişki üzerinden tanımlamıştır.

Kentsel su sistemlerinde ise su verimliliği göstergeleri çoğunlukla dağıtım şebekesi performansına odaklanmaktadır. Gelir getirmeyen su (Non-Revenue Water, NRW) oranı, fiziksel kayıplar ve su kayıp oranları, su idarelerinin performansını değerlendirmede en sık kullanılan göstergeler arasında yer almaktadır (Rogers & Louis, 2005). Ancak bu göstergelerin tek başına kullanılması, altyapı yaşı, işletme koşulları ve veri kalitesi gibi faktörler dikkate alınmadığında yanıltıcı sonuçlar doğurabilmektedir (Fırat et al., 2021).

Standartlaştırılmış ve Karşılaştırılabilir Performans Göstergeleri

Su verimliliğinin farklı sistemler arasında karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilebilmesi için standartlaştırılmış performans göstergelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Rogers ve Louis (2005), topluluk ölçeğindeki su sistemleri için standart bir verimlilik metriği önererek, bu tür göstergelerin karar vericiler için ortak bir değerlendirme zemini oluşturduğunu vurgulamıştır. Fekete ve Stakhiv (2014) ise su kaynakları yönetiminde kullanılan göstergelerin yalnızca teknik performansı değil, yönetsel kapasiteyi de yansıtması gerektiğini belirtmiştir.

Kentsel su hizmetlerinde su verimliliği göstergeleri, enerji ve ekonomik performans göstergeleri ile birlikte ele alındığında daha anlamlı sonuçlar üretmektedir. Walker ve arkadaşları (2020), su idarelerinde enerji ve ekonomik verimliliği açıklayan anahtar performans göstergelerini incelemiş ve su verimliliği göstergelerinin bu boyutlardan bağımsız değerlendirilmesinin eksik bir analiz sunduğunu ortaya koymuştur.

Dinamik ve Performans Temelli Su Verimliliği Göstergeleri

Güncel literatürde su verimliliği göstergelerinin statik oranlardan ziyade, zamana bağlı değişimleri yansıtan dinamik metrikler üzerinden ele alınması gerektiği yönünde güçlü bir eğilim bulunmaktadır. Fagan ve arkadaşları (2010), bütünleşik kentsel su sistemleri için geliştirdikleri dinamik performans metrikleri ile, su verimliliğinin uzun dönemli sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği ile birlikte değerlendirilebileceğini göstermiştir. Benzer biçimde Zhang ve arkadaşları (2018), endüstriyel su kirliliği bağlamında geliştirdikleri dinamik çevresel etkinlik yaklaşımı ile, su verimliliğinin zamansal değişiminin analiz edilmesinin önemine dikkat çekmiştir.

Endüstriyel sistemlerde dijitalleşme ile birlikte yeni göstergeler geliştirilmiştir. Braglia ve arkadaşları (2025), yalın üretim yaklaşımından türetilen “Overall Water Effectiveness (OWE)” göstergesini önererek, su verimliliğinin dijital ortamda bütüncül biçimde izlenebileceğini ortaya koymuştur. Bu gösterge, su kayıpları, yeniden kullanım oranları ve proses performansını birlikte değerlendirmesi bakımından geleneksel göstergelerden ayrılmaktadır.

Göstergelere Yönelik Eleştiriler ve Sınırlılıklar

Su verimliliği göstergelerinin yaygın kullanımı, bu göstergelerin politika ve planlama süreçlerinde nasıl yorumlandığına ilişkin eleştirileri de beraberinde getirmiştir. Özçelik ve arkadaşları (2021), su üretkenliği göstergelerinin bağlamdan bağımsız biçimde kullanılması durumunda, su kaynakları üzerindeki baskının artabileceğini vurgulamıştır. Bu durum, su verimliliği göstergelerinin sistem sınırları ve ölçek dikkate alınmadan kullanılmasının ciddi riskler taşıdığını göstermektedir.

Ayrıca performans göstergelerinin güvenilirliği, büyük ölçüde veri kalitesine bağlıdır. Nafi ve Brans (2018), su idarelerinin performansını tahmin etmeye yönelik çalışmalarında, su verimlilik oranlarının doğru yorumlanabilmesi için tutarlı ve güvenilir veri setlerine ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Tarımsal sulama sistemleri için geliştirilen performans göstergeleri de benzer sınırlılıklar taşımakta olup, sistemler arası karşılaştırmalarda dikkatli kullanılmalıdır (Atabay & Gündoğdu, 2024).

KENTSEL SU SİSTEMLERİNDE SU VERİMLİLİĞİ

Kentsel su sistemleri, içme suyu sağlama, dağıtım işlemleri, atık su toplama ve arıtım gibi birbirine bağlı alt yapıları içeren karmaşık yapılardır. Bu sistemlerde su verimliliği, yalnızca tüketicinin düşürülmesiyle ilgili olmayıp, suyun sistem içindeki hareketi, kayıplar, tekrar kullanım olanakları ve enerji ile etkileşim açısından çok boyutlu bir değerlendirme gerektiren bir kavramdır. Özellikle hızlı şehirleşme, iklim değişikliği ve altyapıların eskimesi gibi etmenler, kentsel su sistemlerinde verimlilik odaklı yaklaşımların önemini artırmaktadır.

Kentsel Su Sistemlerinde Su Verimliliğinin Kapsamı

Kentsel su sistemlerinde su verimliliği, suyun kaynaktan alınarak şebeke hattı ile son kullanıcıya ulaştırılmasından tekrar alıcı ortama dönüşüne kadar geçen tüm aşamaları içeren bir değerlendirme ile ele alınmalıdır. Kentsel su sistemlerinde verimlilik sadece altyapı elemanları üzerinden değerlendirilemez. Süreçte su temini ve atıksu yönetimi birbirinden bağımsız değildir. Bunlar birbiri ile doğrudan ilişkili birer bütünleşik sistemlerdir (Fagan ve ark. 2010). Bu çerçevede kentsel su verimliliği; (i) fiziksel kayıpların azaltılması, (ii) su yönetimi, (iii) enerji-su ilişkilerinin optimize edilmesi ve (iv) alternatif su kaynaklarının sisteme dahil edilmesi gibi temel bileşenler üzerinden değerlendirilmektedir.

Son yıllarda kentsel su verimliliğinin değerlendirilmesinde öne çıkan yaklaşımlardan biri, kentsel su metabolizması kavramıdır. Kentsel su metabolizması yaklaşımı, su verimliliğinin değerlendirilmesinde sistem sınırlarının genişletilmesine olanak tanımakta ve farklı su kaynaklarının birlikte ele alınmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, su verimliliğinin yalnızca arz tarafında değil, talep ve yeniden kullanım boyutlarında da iyileştirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesini desteklemektedir.

Enerji-Su Etkileşimi ve Verimlilik

Kentsel su sistemlerinde su verimliliği ile enerji verimliliği arasındaki ilişki giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Su temini, dağıtımı ve atıksu arıtımı süreçleri önemli miktarda enerji tüketmekte olup, su verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar çoğu zaman enerji tüketiminde de değişimlere yol açmaktadır. Gay ve Sinha (2012), kentsel su sistemlerinde enerji verimliliğini mekanistik bir yaklaşımla ele alarak, su akışları ile enerji tüketimi arasındaki ilişkilerin sistem performansı açısından kritik olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Loureiro ve arkadaşları (2020), su temininde enerji verimliliğinin değerlendirilmesine yönelik yaptıkları çalışmada, su verimliliği göstergelerinin enerji performansı ile birlikte ele alınmasının gerekliliğini bildirmiştir. Bu çalışmalar, su verimliliğinin yalnızca su miktarı ile değil, aynı zamanda enerji ve maliyet boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Hibrit ve Alternatif Su Temin Sistemleri

Kentsel su verimliliğini artırmaya yönelik bir diğer önemli yaklaşım, alternatif ve hibrit su temin sistemlerinin birlikte değerlendirilmesidir. Hibrit su temin sistemleri; su şebekeleri ile yağmur suyu hatları, gri su ve yerel su kaynaklarının birlikte kullanıldığı sistemlerdir. Bu tür sistemler, özellikle su stresinin yüksek olduğu bölgelerde kentsel su verimliliğini artırma açısından oldukça önemlidir.

Hibrit sistemler, merkezi altyapı üzerindeki yükü azaltarak hem su kayıplarını hem de enerji tüketimini düşürebilmektedir. Ancak bu sistemlerin etkin biçimde uygulanabilmesi, kentsel planlama, işletme kapasitesi ve kullanıcı davranışları gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle hibrit su temin sistemleri, kentsel su verimliliği stratejilerinin bir parçası olarak dikkatle değerlendirilmelidir.

Performans Temelli Yaklaşımlar

Kentsel su sistemlerinde su verimliliğinin artırılmasına yönelik stratejilerin başarısı, performans temelli değerlendirme yaklaşımlarının etkin biçimde uygulanmasına bağlıdır. Dinamik performans ölçütleri, kentsel su sistemlerinde uygulanan politika ve teknolojilerin uzun vadeli etkilerini değerlendirmede önemli avantajlar sunmaktadır (Fagan ve ark. 2010).

Bununla birlikte kentsel su sistemlerinde su verimliliğinin değerlendirilmesinde veri eksikliği, yetersiz altyapı ve kurumlar arası koordinasyon sorunları gibi etkenler performans göstergelerinin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Kentsel su metabolizması analizlerinde verilerin bütünleştirilmesi en kritik aşamalardan biridir (Renouf ve ark. 2018). Bu bağlamda, su verimliliğinin artırılmasına yönelik çabaların teknik çözümler kadar yönetsel ve kurumsal kapasite geliştirme ile desteklenmesi gerekmektedir.

ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE SU VERİMLİLİĞİ

Endüstriyel sistemler, suyun yoğun ve çok amaçlı biçimde kullanıldığı, aynı zamanda önemli miktarda atıksu ve kirletici yükün ortaya çıktığı üretim ortamlarıdır. Bu nedenle su verimliliği, endüstriyel faaliyetler açısından

yalnızca çevresel bir hedef değil, aynı zamanda ekonomik rekabet gücü ve kaynak güvenliği ile doğrudan ilişkili stratejik bir unsurdur. Sanayi sektöründe su verimliliğinin artırılması, üretim süreçlerinin yeniden yapılandırılmasını, teknolojik yeniliklerin benimsenmesini ve performans temelli yönetim yaklaşımlarının uygulanmasını gerektirmektedir.

Endüstriyel Su Verimliliğinin Kavramsal Çerçevesi

Endüstriyel su verimliliği, genel olarak birim üretim başına kullanılan su miktarının azaltılması olarak tanımlanır. Ancak, bu yaklaşım sistem performansının tüm boyutlarını yansıtmaz. Su endüstrisinde verimlilik kavramı yalnızca fiziksel girdilerle sınırlı değildir. Aynı zamanda üretim teknolojileri, işletme uygulamaları ve yönetsel kararlar da verimlilik üzerinde belirleyici etkiye sahiptir (Abbott ve Cohen, 2009). Bu bağlamda endüstriyel su verimliliği, teknik verimlilik ile birlikte yönetsel ve ekonomik etkinliği de kapsayan çok boyutlu bir kavram olarak ele alınmalıdır.

Endüstriyel tesislerde su; proses suyu, soğutma suyu, yıkama suyu ve yardımcı hizmetler gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bu durum suyun sistem içerisindeki dolaşımını karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle su verimliliğinin değerlendirilmesi, yalnızca toplam su tüketimine değil, suyun süreçler arasındaki dağılımına ve geri kazanım potansiyeline de odaklanmalıdır.

Teknolojik Yaklaşımlar ve Süreç İyileştirme

Endüstriyel su verimliliğinin artırılmasında teknolojik yenilikler önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmekte olan teknolojiler endüstrilerde hem su hem de enerji verimliliğini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir (Hasanbeigi ve Price, 2015). Bu teknolojiler arasında kapalı devre su sistemleri, ileri arıtma ve geri kazanım teknolojileri, düşük su tüketimli proses ekipmanları öne çıkmaktadır.

Teknolojik iyileştirmeler, suyun sistem içerisindeki tekrar kullanımını artırarak su talebini azaltmakta ve buna bağlı olarak oluşacak atıksu miktarını düşürmektedir. Ancak bu tür teknolojilerin etkin biçimde uygulanabilmesi, mevcut üretim altyapısının durumu, yatırım maliyetleri ve işletme kapasitesi

gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle teknolojik çözümler, tek başına değil, bütüncül bir su verimliliği stratejisinin parçası olarak değerlendirilmelidir.

Teknolojik Yenilik, Düzenleyici Çerçeve ve Verimlilik

Teknolojik yenilik ile çevresel düzenlemeler arasındaki etkileşim, endüstriyel su verimliliği üzerinde etkili olan bir diğer önemli unsurdur. Jin ve arkadaşları (2019), endüstriyel su kaynaklarının yeşil toplam faktör verimliliğini inceleyerek, teknolojik inovasyonun su verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çevresel düzenlemelerin tasarımı ve uygulanma biçimi, bu inovasyonların yaygınlaşmasını doğrudan etkilemektedir.

Uygun biçimde tasarlanmış çevresel düzenlemeler, işletmeleri daha verimli ve çevre dostu teknolojileri uygulamaya teşvik edebilmektedir. Ancak aşırı katı veya esnek olmayan düzenlemeler, kısa vadede maliyet baskısı yaratarak verimlilik kazanımlarını sınırlayabilmektedir. Bu durum, endüstriyel su verimliliğinin artırılmasında politika araçlarının dikkatle tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Performans ve Verimlilik Değerlendirme Yaklaşımları

Endüstriyel sistemlerde su verimliliğinin izlenmesi ve değerlendirilmesi, performans göstergelerinin doğru seçimine bağlıdır. Verimlilik analizlerinde girdi-çıktı ilişkilerinin yanı sıra toplam faktör verimliliği yaklaşımlarının da dikkate alınması gerekmektedir (Abbott ve Cohen, 2009). Bu tür yaklaşımlar, su verimliliğini enerji, iş gücü ve sermaye gibi diğer üretim faktörleri ile birlikte değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Toplam faktör verimliliği ve yeşil verimlilik göstergeleri, endüstriyel su kullanımının çevresel etkilerle birlikte ele alınmasını mümkün kılmaktadır. Bu göstergeler, teknolojik ilerlemenin su verimliliği üzerindeki etkilerini analiz etmek için güçlü bir araçtır (Jin ve ark. 2019). Performans temelli değerlendirme yaklaşımları, endüstriyel su verimliliği stratejilerinin etkinliğini ölçmede önemli bir rol oynamaktadır.

Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Endüstriyel su verimliliğinin artırılmasına yönelik çabalar, önemli fırsatlar sunmakla birlikte çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Teknolojik yatırımların yüksek maliyeti, veri eksikliği ve işletme düzeyinde farkındalık yetersizliği, su verimliliği uygulamalarının yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde finansal ve teknik kapasite eksikliği, su verimliliği teknolojilerinin benimsenmesini zorlaştırmaktadır (Hasanbeigi ve Price, 2015).

Gelecekte endüstriyel su verimliliği çalışmalarının, dijitalleşme, süreç otomasyonu ve entegre kaynak yönetimi yaklaşımları ile daha da güçlenmesi beklenmektedir. Teknolojik yeniliklerin, uygun düzenleyici çerçevelerle desteklenmesi hâlinde, su verimliliği hem çevresel sürdürülebilirlik hem de endüstriyel rekabet gücü açısından önemli kazanımlar sağlayacaktır (Jin et al., 2019).

SU VERİMLİLİĞİNİ DESTEKLEYEN TEKNOLOJİLER

Su Kullanım Verimliliğini Artırmaya Yönelik Teknolojiler

Su verimliliğini artırmaya yönelik teknolojilerin temeli, suyun uygulama noktasında daha uygun miktarda ve doğru zamanda kullanılmasına dayanmaktadır. Su kullanım verimliliğini iyileştirmeye yönelik yöntem ve teknolojilerin değerlendirilmesinde, ölçüm, kontrol ve geri bildirim mekanizmaları verimlilik artışında belirleyici unsurlardır (Evans ve Sadler, 2008). Bu kapsamda basınç kontrolü, akış ölçümü, sızıntı tespiti ve sistem optimizasyonu gibi teknolojiler, hem tarımsal hem de kentsel sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tür teknolojiler, özellikle fiziksel kayıpların azaltılmasında ve suyun gereksiz kullanımının önlenmesinde etkili olmakla birlikte, sistem performansının sürdürülebilir biçimde iyileştirilmesi için daha ileri düzey izleme ve karar destek mekanizmaları ile desteklenmelidir.

Akıllı Su Teknolojileri ve Dijitalleşme

Son yıllarda su verimliliği alanında en hızlı gelişen alanlardan biri, akıllı su teknolojileri ve dijital çözümler olmuştur. Akıllı su teknolojileri; sensörler, veri toplama sistemleri, uzaktan izleme, yapay zekâ ve karar destek araçlarını kapsar (Gupta ve ark. 2020). Bu teknolojiler, suyun miktar ve kalite açısından gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanıyarak, su verimliliğinin artırılmasında önemli avantajlar sunmaktadır.

Akıllı su teknolojileri, özellikle kentsel su sistemlerinde kaçakların erken tespiti, talep tahmini ve sistem optimizasyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak bu teknolojilerin etkinliği, veri kalitesi, altyapı uyumluluğu ve kurumsal kapasite gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle dijitalleşme, su verimliliğini otomatik olarak artıran bir çözüm değil, uygun yönetsel çerçeve ile desteklenmesi gereken bir araç olarak değerlendirilmelidir.

Teknolojik Yeniliklerin Su Verimliliğine Etkisi

Su verimliliğini destekleyen teknolojilerin geliştirilmesi kadar, bu teknolojilerin yaygınlaşması da kritik öneme sahiptir. Su temini ve su verimliliği teknolojilerindeki yenilikler ülkeler ve sektörler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Teknolojik yeniliklerin büyük ölçüde ekonomik teşvikler ve düzenleyici çerçeveler tarafından şekillendirildiğini göstermektedir (Conway ve ark. 2015). Ayrıca teknolojik yenilikler, uygun kurumsal ve politik ortam sağlandığında su verimliliğini anlamlı biçimde artırabilmektedir. Bu durum, teknolojinin tek başına yeterli olmadığını; yenilikçi yaklaşımı destekleyen politika ve yönetim mekanizmalarının da kritik olduğunu göstermektedir.

Tarımsal Sistemlerde Akıllı ve Teknoloji Tabanlı Çözümler

Tarımsal sistemler, küresel su kullanımının en büyük payına sahip olması nedeniyle, su verimliliğini destekleyen teknolojilerin en yoğun uygulandığı alanlardan biridir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde su kullanım verimliliğini artırmaya yönelik tarımsal ve teknoloji tabanlı stratejiler önemli verimlilik kazanımları sağlamaktadır (Alharbi ve ark. 2024).

Akıllı sulama teknolojileri, suyun bitki ihtiyacına göre doğru zamanda ve doğru miktarda uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Akıllı sulama teknolojileri sürdürülebilir tarım açısından su kullanım verimliliğini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir (Ali ve ark. 2025). Bununla birlikte bu sistemlerin etkinliği, çiftçi eğitimi, maliyetler ve altyapı erişimi gibi faktörlerden etkilenmektedir.

Su Verimliliğini Destekleyen Teknolojilerin Uygulama Sınırları

Su verimliliğini destekleyen teknolojiler önemli fırsatlar sunmakla birlikte, bazı sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Yüksek yatırım maliyetleri, veri güvenliği sorunları ve teknik kapasite eksikliği, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını sınırlandıran temel faktörler arasında yer almaktadır (Conway ve ark. 2015). Ayrıca farklı teknolojilerin birbirinden bağımsız biçimde uygulanması, beklenen verimlilik kazanımlarının elde edilmesini zorlaştırabilmektedir.

Bu nedenle su verimliliğini artırmaya yönelik teknolojilerin, sistem düzeyinde entegre bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. Teknoloji seçimi, sistem özellikleri, kullanıcı davranışları ve yönetsel kapasite ile uyumlu biçimde yapılmalıdır.

SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Kentsel ve endüstriyel sistemlerde su verimliliği kavramı; kavramsal çerçevesi, performans göstergeleri, sistem düzeyinde değerlendirme yaklaşımları ve teknolojik destek unsurları ile birlikte ele alınmalıdır. Literatürde yer alan çalışmaların bütüncül olarak değerlendirilmesi, su verimliliğinin yalnızca su tüketiminin azaltılmasına indirgenemeyecek kadar çok boyutlu ve sistem bağımlı bir kavramdır.

Su verimliliğinin kavramsal temellerine ilişkin bulgular, bu kavramın sistem sınırları ve ölçek ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Tarımsal sistemler için geliştirilen kavramsal çerçevelerin (Bouman, 2007; Moore et al., 2011), kentsel ve endüstriyel sistemlere uyarlanabilir nitelikte olduğu göstermektedir. Ancak bu durum, suyun kentsel metabolizma içerisindeki akışlarını ve endüstriyel süreçlerdeki çoklu kullanım biçimlerini dikkate alacak

şekilde genişletilmesi gerekmektedir. Bu durum, su verimliliğinin tekil tesisler veya prosesler yerine, sistem düzeyinde ele alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Performans göstergelerine ilişkin yapılan çalışmalar, su verimliliğinin ölçümünde kullanılan metriklerin amaca, ölççeğe ve bağlama bağlı olarak dikkatle seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Oran temelli geleneksel göstergeler, uygulama kolaylığı sağlamalarına karşın, sistem performansını çevresel ve ekonomik boyutlarıyla birlikte yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir (Abbott & Cohen, 2009; Rogers & Louis, 2005). Dinamik performans metrikleri ve dijital göstergeler ise, su verimliliğinin zaman içerisindeki değişimini izleme ve politika ile teknoloji etkilerini değerlendirme açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Fagan et al., 2010; Braglia et al., 2025).

Kentsel su sistemlerine odaklanan çalışmalar, su verimliliğinin yalnızca dağıtım kayıplarının azaltılmasıyla sınırlı olmadığını, enerji-su etkileşimi, alternatif su kaynaklarının entegrasyonu ve bütünsel sistem yönetimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (Gay & Sinha, 2012; Loureiro et al., 2020; Renouf et al., 2018). Kentsel su metabolizması ve hibrit su temin sistemleri yaklaşımları, su verimliliğinin artırılmasında merkezi altyapılara ek olarak yerel ve alternatif çözümlerin de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Sapkota et al., 2014). Bu bulgular, kentsel su verimliliğinin teknik olduğu kadar yönetsel ve planlama boyutları bulunan bir alan olduğunu göstermektedir.

Endüstriyel sistemler açısından değerlendirildiğinde, su verimliliğinin teknolojik yenilik, süreç optimizasyonu ve düzenleyici çerçeve ile güçlü biçimde ilişkili olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, ileri arıtma ve geri kazanım teknolojileri, kapalı devre su sistemleri ve proses entegrasyonu gibi uygulamaların su verimliliğini önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymaktadır (Hasanbeigi & Price, 2015). Bununla birlikte, teknolojik inovasyonun verimlilik üzerindeki etkisinin, çevresel düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları ile desteklenmediği durumlarda sınırlı kaldığı da vurgulanmaktadır (Jin et al., 2019).

Su verimliliğini destekleyen teknolojilere ilişkin bulgular, dijitalleşme, akıllı sistemler ve veri temelli karar destek araçlarının giderek daha önemli hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Akıllı su teknolojileri ve hassas sulama uygulamaları, özellikle su stresinin yüksek olduğu bölgelerde önemli verimlilik kazanımları sağlayabilmektedir (Gupta et al., 2020; Alharbi et al., 2024; Ali et al., 2025). Ancak, yapılan çşımlar bu teknolojilerin otomatik olarak verimlilik artışı sağlamadığını veri kalitesi, kullanıcı kapasitesi ve kurumsal yapı gibi unsurların başarı üzerinde belirleyici olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Evans & Sadler, 2008; Conway et al., 2015).

Sonuç olarak, kentsel ve endüstriyel sistemlerde su verimliliğinin artırılması, yalnızca mevcut uygulamaların iyileştirilmesi değil, aynı zamanda sistem düzeyinde düşünme, disiplinler arası yaklaşımlar ve uzun vadeli planlama gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

- Collins D.N., & Dormer J., (1997). Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel, *Heat Treatment Met.* 3. <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0089-z>
- Abbott, M., Cohen, B. (2009). Productivity and efficiency in the water industry. *Utilities Policy*, 17(3-4), pp. 233-244.
- Akkuzu, E., Mengü, G. P. (2011). Alaşehir yöresi sulama birliklerinin arazi-su verimliliği ve su temini açısından değerlendirilmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 48(2), pp.119-126.
- Ali, A., Hussain, T., Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106.
- Atabay, N., Gündoğdu, K. S. (2024). Sulama Birliklerinin Değerlendirilmesinde Kullanılan Sulama Performans Göstergelerinin Önem Düzeylerinin Belirlenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38(2), pp. 325-339.
- Bai, M., Zhou, S., Zhao, M., Yu, J. (2017). Water use efficiency improvement against a backdrop of expanding city agglomeration in developing countries—A case study on industrial and agricultural water use in the Bohai Bay Region of China. *Water*, 9(2), 89.
- Bindra, S. P., Muntasser, M. D., El Khweldi, M., El Khweldi, A. (2003). Water use efficiency for industrial development in Libya. *Desalination*, 158(1-3), pp. 167-178.
- Bouman, B. A. M. (2007). A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. *Agricultural systems*, 93(1-3), pp. 43-60.
- Braglia, M., Mohamed, A. S., Dipaco, F., Gabbriellini, R., Marrazzini, L. (2025). Overall Water Effectiveness: a new Lean indicator for digital evaluation of water efficiency in industrial processes. *Journal of Industrial Information Integration*, 101031.
- Conway, D., Dechezleprêtre, A., Haščič, I., Johnstone, N. (2015). Invention and diffusion of water supply and water efficiency technologies: insights from a global patent dataset. *Water Economics and Policy*, 1(04), 1550010.
- Evans, R. G., Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water resources research*, 44(7).
- Fagan, J. E., Reuter, M. A., & Langford, K. J. (2010). Dynamic performance metrics to assess sustainability and cost effectiveness of integrated urban water systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), pp. 719-736.
- Fekete, B. M., Stakhiv, E. Z. (2014). Performance indicators in the water resources management sector. In *The Global Water System in the*

- Anthropocene: Challenges for Science and Governance (pp. 15-26). Cham: Springer International Publishing.
- Fırat, M., Orhan, C., Yılmaz, S., Özdemir, Ö. (2021). Su İdarelerinin su kayıp yönetim performansının analizi ve temel performans gösterge hesaplama aracının geliştirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), pp. 75-88.
- Gay, L. F., & Sinha, S. K. (2012). Measuring energy efficiency in urban water systems using a mechanistic approach. *Journal of infrastructure systems*, 18(2), 139-145.
- Gupta, A. D., Pandey, P., Feijóo, A., Yaseen, Z. M., Bokde, N. D. (2020). Smart water technology for efficient water resource management: A review. *Energies*, 13(23), 6268.
- Hasanbeigi, A., Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 95, pp. 30-44.
- Jin, W., Zhang, H. Q., Liu, S. S., Zhang, H. B. (2019). Technological innovation, environmental regulation, and green total factor efficiency of industrial water resources. *Journal of cleaner production*, 211, pp. 61-69.
- Liang, X., Zhou, Z. (2022). Technical efficiency measurement of urban industrial water: a case study of cities in China. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 33(4), pp. 1046-1060.
- Liu, B., Li, Y., Hou, R., Wang, H. (2019). Does urbanization improve industrial water consumption efficiency?. *Sustainability*, 11(6), 1787.
- Loureiro, D., Silva, C., Cardoso, M. A., Mamade, A., Alegre, H., Rosa, M. J. (2020). The development of a framework for assessing the energy efficiency in urban water systems and its demonstration in the Portuguese water sector. *Water*, 12(1), 134.
- Moore, A. D., Robertson, M. J., Routley, R. (2011). Evaluation of the water use efficiency of alternative farm practices at a range of spatial and temporal scales: A conceptual framework and a modelling approach. *Agricultural Systems*, 104(2), pp. 162-174.
- Nafi, A., Brans, J. (2018). Prediction of water utility performance: The case of the water efficiency rate. *Water*, 10(10), 1443.
- Ozcelik, N., Rodríguez, M., Lutter, S., Sartal, A. (2021). Indicating the wrong track? A critical appraisal of water productivity as an indicator to inform water efficiency policies. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105452.
- Renouf, M. A., Kenway, S. J., Lam, K. L., Weber, T., Roux, E., Serrao-Neumann, S., ... Morgan, E. A. (2018). Understanding urban water performance at the city-region scale using an urban water metabolism evaluation framework. *Water research*, 137, pp. 395-406.
- Rogers, J. W., Louis, G. E. (2005). A standard efficiency metric for evaluating the performance of community water systems. *Journal-American Water Works Association*, 97(10), pp. 76-86.

- Sachidananda, M., Webb, D. P., Rahimifard, S. (2016). A concept of water usage efficiency to support water reduction in manufacturing industry. *Sustainability*, 8(12), 1222.
- Sapkota, M., Arora, M., Malano, H., Moglia, M., Sharma, A., George, B., Pamminer, F. (2014). An overview of hybrid water supply systems in the context of urban water management: Challenges and opportunities. *Water*, 7(1), pp. 153-174.
- Tan, J., Zou, X. Y. (2023). Water-related technological innovations and water use efficiency: international evidence. *Emerging Markets Finance and Trade*, 59(15), pp. 4138-4157.
- Turan, E. S. (2017). Türkiye'nin su ayak izi değerlendirmesi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(EK-1), pp. 55-62.
- Walker, N. L., Williams, A. P., Styles, D. (2020). Key performance indicators to explain energy & economic efficiency across water utilities, and identifying suitable proxies. *Journal of Environmental Management*, 269, 110810.
- Wang, Y., Bian, Y., Xu, H. (2015). Water use efficiency and related pollutants' abatement costs of regional industrial systems in China: a slacks-based measure approach. *Journal of Cleaner Production*, 101, pp. 301-310.
- Yüçetürk, G. D., & Alkan, S. N. (2024). Sıfır Atık İndeksi Kullanılarak Türkiye'deki Kentsel Katı Atık Yönetiminde Sıfır Atık Yaklaşımının İncelenmesi. *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 60-88.
- Yükçü, S., Atağan, G. (2009). Etkinlik, Etkililik Ve Verimlilik Kavramlarının Yarattığı Karışıklık. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(4), pp. 1-13.
- Zhang, Z., Zhang, X., Shi, M. (2018). Urban transformation optimization model: How to evaluate industrial structure under water resource constraints?. *Journal of cleaner production*, 195, pp. 1497-1504.

BÖLÜM 7

PARAPROBİYOTİK ÜRETİMİNDE İLERİ SÜREÇ TEKNOLOJİLERİ VE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Öğr. Gör. Esen Bilge BİÇER ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146457>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Ziraat Mühendisliği MYO, Gıda İşleme Bölümü, Türkiye
bbicer@cumhuriyet.edu.tr Orcid ID: 0000-0003-0500-8303.

GİRİŞ

Paraprobiyotikler (non-viable probiotics), canlılık göstermeyen ancak yapısal bileşenleri veya metabolit profilleri aracılığıyla konakçıya sağlık yararı sağlayabilen inaktive edilmiş mikroorganizmalardır. İlk olarak Taverniti ve Guglielmetti (2011) tarafından tanımlanan paraprobiyotik kavramı, probiyotik etkinin her zaman canlılık gerektirmediğinin anlaşılmasıyla birlikte son yıllarda gıda teknolojisi ve fonksiyonel ürün geliştirme alanlarında hızlı bir şekilde önem kazanmıştır. Gıda endüstrisinde probiyotiklerin kullanımı uzun süredir yaygın olmakla birlikte, canlı mikroorganizmaların ısı, oksidasyon, düşük pH, su aktivitesi, depolama koşulları ve proses streslerine yüksek derecede duyarlı olması; ürün raf ömrü boyunca canlılığın korunmasında önemli zorluklar yaratmaktadır (Siciliano ve ark., 2021).

Bu bağlamda paraprobiyotikler, ısı dayanımı, yüksek raf ömrü stabilitesi, güvenlik avantajları ve geniş uygulama alanları nedeniyle gıda mühendisliği açısından daha uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmekte; özellikle ısıl işlem gerektiren proseslerde probiyotiklere kıyasla daha yüksek fonksiyonel sürdürülebilirlik sunmaktadır. Canlı probiyotiklerin gıda matrislerinde hayatta kalma zorunluluğu, formülasyon ve proses kısıtlamaları oluştururken, paraprobiyotikler bu kısıtlamaları ortadan kaldırarak daha geniş ürün kategorilerinde kullanılabilir (Yolmeh ve ark., 2024).

Gıda mühendisliğinde proses tasarımı açısından paraprobiyotiklerin en büyük avantajı, canlı mikroorganizmaların aksine proses koşullarının bu bileşenlerde ölüm riskine bağlı olarak sınırlanmamasıdır. Örneğin yüksek sıcaklıkta pişirilen veya UHT işlem gören ürünlerde, probiyotiklerin hayatta kalma şansı oldukça düşükken, paraprobiyotikler canlılık gerektirmediği için bu tür proseslere entegre edilebilir. Bu durum, fonksiyonel ürün tasarımını kolaylaştırmakta ve probiyotik ürün yelpazesinin geleneksel fermente ürünlerden çok daha geniş kategorilere (firincılık ürünleri, steril içecekler, ısıl işlem görmüş soslar, RTE ürünler) yayılmasını mümkün kılmaktadır (Sionek ve Gantner, 2025).

Son yıllarda gıda endüstrisinde non-termal teknolojilerin yükselişi, paraprobiyotik üretimine yönelik ilginin artmasını sağlayan temel faktörlerden biridir. Yüksek hidrostatik basınç (HHP), ultrasonik kavitasyon, pulsed electric field (PEF), soğuk plazma ve LED-tabanlı fotodinamik inaktivasyon gibi non-termal veya minimal-termal işlemler, mikrobiyal hücreleri canlılık kaybına uğrattırırken hücre duvarı ve yüzey bileşenlerinin yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruyabilmektedir (Pasdar ve ark., 2024). Bu özellik, paraprobiyotiklerin immünomodülatör aktivitesi ve fonksiyonel etkinliği

açısından kritik olan yapısal unsurların korunmasını sağladığı için, bu teknolojiler paraprobiyotik üretimi için ideal proses seçenekleri olarak değerlendirilmektedir.

Non-termal teknolojilerin gıdanın duyuşsal ve besinsel özellikleri üzerinde ısı işlemlere kıyasla daha az zararlı etki göstermesi de gıda mühendisliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik potansiyeli, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırmaktadır (Sheng ve ark., 2022).

Tüm bu gelişmeler, paraprobiyotiklerin gıda endüstrisi için yalnızca bilimsel bir kavram değil, aynı zamanda yeni nesil fonksiyonel ürün tasarımında stratejik bir bileşen olarak öne çıktığını göstermektedir. Bu nedenle, paraprobiyotik üretimine yönelik proses mühendisliği yaklaşımının anlaşılması, gıda endüstrisinde daha güvenli, stabil ve fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Gıda Mühendisliğinde Paraprobiyotik Üretiminin Temel İlkeleri

Paraprobiyotik üretimi, mikroorganizmaların kontrollü biçimde inaktive edilmesi ve bu süreçte hücresel bütünlüğün, yüzey bileşenlerinin ve immünomodülatör yapıların korunmasını hedefleyen çok disiplinli bir gıda mühendisliği yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, probiyotik hücrelerden elde edilen inaktive hücrelerin veya hücre fraksiyonlarının konak üzerinde sağlık faydaları sağlayabileceğine dair artan bilimsel kanıtlarla paralel olarak önem kazanmıştır (Taverniti ve Guglielmetti, 2011; Monteiro ve ark., 2023). Paraprobiyotiklerin üretimi sırasında uygulanan fiziksel ve kimyasal süreçler; hücre duvarı komponentlerini, yüzey proteinlerini ve diğer biyoaktif yapıları mümkün olduğunca bozmadan, hücrenin üreme yeteneğini etkili şekilde ortadan kaldırmak üzere optimize edilmelidir (Aguilar-Toalá ve ark., 2020; Teame ve ark., 2020). Bu üretim süreci, mikrobiyal inaktivasyon kinetiği, enerji aktarım mekanizmaları, proses optimizasyonu, gıda matrisi etkileşimleri ve ürün stabilitesi gibi temel mühendislik bileşenlerini içerir ve bu parametrelerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, paraprobiyotik ürünlerin fonksiyonel özelliklerini korumada kritik bir rol oynar (Pimentel ve ark., 2023; Monteiro ve ark., 2023).

Kontrollü İnaktivasyon İlkesi

Paraprobiyotik üretiminde temel amaç, mikroorganizmaların canlılık yeteneğini geri dönüşsüz biçimde sonlandırırken hücresel yapıların fonksiyonel bütünlüğünü korumaktır. Bu bağlamda hücre duvarı bileşenleri, yüzey proteinleri, lipoteikoik asit (LTA), peptidoglikan (PG) ve ekzopolisakkaritler

(EPS) gibi biyolojik olarak aktif moleküllerin hasar görmemesi kritik öneme sahiptir; çünkü paraprobiyotik etkinliğin önemli bir bölümü bu yapılara bağlıdır. “Paraprobiotic” terimi de zaten, canlılık göstermeyen mikrobiyal hücrelerin veya hücre fraksiyonlarının sağlık üzerine yararlı etkilerini vurgulamak amacıyla önerilmiştir. Aşırı ısı, yüksek basınç ya da yoğun mekanik stres gibi uygun olmayan inaktivasyon koşulları bu yapıların denatürasyonuna veya parçalanmasına yol açabildiğinden, prosesin ölçülü ve kontrollü, yani fonksiyonel yapıları koruyacak optimum şiddette yürütülmesi gereklidir (Taverniti ve Guglielmetti, 2011; Vallejo-Cordoba ve ark., 2020).

Hem termal hem de non-termal inaktivasyon teknolojilerinde hücreye aktarılan enerji; sıcaklık, basınç, elektrik alan şiddeti, ışık yoğunluğu veya CO₂ çözünürlüğü gibi fiziksel parametrelerin hassas kontrolü ile düzenlenir. Paraprobiyotik elde etmeye yönelik süreçlerde bu kontrol, genellikle D- ve z-değerleri, inaktivasyon hız sabitleri, membran permeabilitesi ve hücresel bütünlük analizleri gibi kinetik ve morfolojik göstergeler üzerinden değerlendirilir (Barros ve ark., 2020). Böylece inaktivasyonun, hücrelerin üreme yeteneğini ortadan kaldırırken fonksiyonel yüzey bileşenlerine ve hücre duvarı yapısına mümkün olduğunca az zarar verdiği doğrulanır. Farklı inaktivasyon yöntemlerinin (örneğin ohmik ısıtma, yüksek hidrostatik basınç, ultrason, PEF vb.) paraprobiyotik hücre yapısı üzerindeki etkilerinin karşılaştırıldığı çalışmalar da bu optimizasyon yaklaşımını desteklemektedir (Almada ve ark., 2021).

Canlı probiyotiklerden farklı olarak paraprobiyotiklerde metabolik aktivite bulunmadığından, ürün stabilitesi büyük ölçüde hücresel yapıların işlem sonrası bozulmadan korunmasına bağlıdır. Bu stabilite yalnızca kullanılan inaktivasyon yöntemine değil; aynı zamanda su aktivitesi, sıcaklık, pH, iyonik güç, depolama atmosferi ve gıda matrisi bileşimi gibi çevresel faktörlere de sıkı biçimde bağlıdır (Vallejo-Cordoba ve ark., 2020). Bu nedenle paraprobiyotik üretiminde gıda mühendisliği yaklaşımı, inaktivasyon aşaması ile depolama ve formülasyon adımlarını birlikte ele alan bütüncül bir süreç tasarımı gerektirir. (Barros ve ark., 2020; Siciliano ve ark., 2021).

Tablo 1. Gıda Matris Bileşenlerinin Paraprobiyotik Hücresel Yapısı ve Fonksiyonelliği Üzerindeki Etkileri

Gıda matris faktörü	Hücresel yapı etkisi	Sonuç
pH	Yüzey proteinlerinin yük dağılımını değiştirir	Adhesyon & fonksiyonellik değişimi
Yağ fazı	Hidrofobik protein etkileşimlerini güçlendirir	Stabilite artışı
Sıcaklık & ısı iletkenlik	Hücre duvarı denatürasyonunu etkiler	Fonksiyonellik kaybı/korunumu
Su aktivitesi	EPS ve peptide bağlı yapıların stabilitesi	Raf ömrü değişimi

Gıda Proseslerinde Kullanılan İnaktivasyon Teknolojileri

Paraprobiyotik üretiminde kilit aşama, mikroorganizmaların kontrollü inaktivasyonudur. Bu süreçte temel amaç, peptidoglikanlar, lipoteikoik asitler (LTA), yüzey proteinleri ve ekzopolisakkaritler (EPS) gibi biyolojik olarak aktif immünomodülatör hücresel yapıların bütünlüğünü korumaktır. Literatürde paraprobiyotik etkiyi belirleyen başlıca yapılar arasında bu yüzey bileşenlerinin bulunduğu açıkça ortaya konmuştur (Taverniti ve Guglielmetti, 2011; de Almada ve ark., 2022). Gıda mühendisliği bağlamında paraprobiyotik eldesi için uygulanan inaktivasyon teknolojileri, prensip olarak ısı prosesler ve ısı olmayan yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu iki teknoloji grubu, hücresel hasarın düzeyini ve yüzey yapılarının korunma kapasitesini belirleyen farklı fiziksel ve kimyasal mekanizmalara dayanmaktadır (Siciliano ve Reale, 2021).

Isıl Prosesler

Isıl işlemler, mikrobiyal inaktivasyon açısından gıda endüstrisinde en eski ve en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Pastörizasyon, UHT (Ultra High Temperature) ve sterilizasyon gibi termal uygulamalar yüksek mikrobiyal güvenlik sağlayabilse de, paraprobiyotik üretiminde hücresel yapıların—özellikle yüzey proteinleri, peptidoglikan tabakası ve immünomodülatör bileşenlerin—korunması gerektiğinden, sıcaklık ve maruziyet süresinin dikkatle optimize edilmesi kritik önem taşır. Aşırı ısı yük, yüzey antijenlerinin denatürasyonuna neden olabileceği için paraprobiyotik işlevselliği zayıflatır; bu nedenle paraprobiyotik üretiminde genellikle düşük-orta sıcaklık aralıklarında kontrol edilmiş, subletal termal işlemler tercih edilmektedir (van Boekel, 2008; Akter ve ark., 2020).

Konvansiyonel ısıl işlem

Konvansiyonel ısıl işlem, ısı transferinin konveksiyon yoluyla gerçekleştiği, gıdanın sıcak su (daldırmalı ısıtma/immersion heating), buhar (buhar ısıtma/steam heating) veya sıcak hava (kuru ısıtma/dry heating) gibi harici bir ısı kaynağıyla temas ettiği en klasik inaktivasyon yöntemidir. Bu yöntemin paraprobiyotik üretimindeki temel amacı, mikroorganizmanın metabolik olarak inaktive edilmesi, ancak hücre morfolojisinin, yüzey yapılarının ve immünomodülatör fraksiyonların mümkün olan en üst düzeyde korunmasıdır. Bu bağlamda konvansiyonel ısıl işlem, “canlılık kaybı ve yapısal bütünlüğün korunması” arasındaki kritik dengeyi sağlaması nedeniyle halen yaygın olarak kullanılan bir metottur (van Boekel, 2008; Akter ve ark., 2020).

Konvansiyonel ısıtmanın paraprobiyotik üretimi için kritik bileşeni, orta sıcaklık–orta süre prensibidir. Genellikle 60–80 °C arasındaki sıcaklıklar, hücre membranında seçici geçirgenlik artışı, protein denatürasyonunun başlangıcı, enzim inaktivasyonu ve Isı Şoku Proteinleri (HSP) gibi hücresel stres yanıtlarını tetikler. Bu sıcaklık aralığı, canlılığın kaybolduğu fakat yüzey yapılarının büyük ölçüde korunduğu kontrollü bir inaktivasyon sağlar (Boekel, 2008; Adams, 2010; van Lee ve ark., 2023). Bu süreçte: (i) sitoplazmik membranın lipid fazı, membran bütünlüğü tamamen bozulmadan kısmen çözünür; (ii) peptidoglikan hücre duvarının makro bütünlüğü korunur, bu da hücre morfolojisinin stabil kalmasını sağlar; (iii) LTA, yüzey proteinleri ve hücre duvarı peptid fraksiyonlarında, paraprobiyotik işlevsellik açısından kabul edilebilir düzeyde stabilite sağlanır. Bu nedenle, konvansiyonel ısıl işlemle inaktive edilen probiyotik bakteriler, immün sistemi uyarıcı aktiviteyi sürdürebilecek yapısal motiflerini koruyarak paraprobiyotik etki gösterebilirler (Taverniti ve Guglielmetti, 2011).

Tablo 2. Konvansiyonel Isıl İşlemin Avantajları ve Sınırlılıkları

Kategori	Avantajlar	Dezavantajlar ve Sınırlılıklar
Kontrol & Yaygınlık	Proses kontrolü kolaydır; sıcaklık ve süre parametreleri hassasiyetle yönetilebilir.	Yüzey proteinlerinin aşırı denatürasyonu riski mevcuttur (özellikle 80 °C üzerindeki uygulamalarda).

	Ekipman altyapısı yaygındır ve ek yatırım maliyeti gerektirmez.	Matris etkisi (yağ, şeker, protein içeriği), ısı transferi değiştirerek inaktivasyon homojenliğini bozabilir (Heldman & Singh, 2018).
Etki Mekanizması	Hedeflenen kontrollü inaktivasyon profili kolaylıkla sağlanabilir.	Bazı probiyotik türlerde (ör: <i>L. helveticus</i>) ısı stres, yüzey yapılarının aşırı bozulmasına yol açabilir.
	Termal stresin kontrollü uygulanması, hücre yüzeyinde belirli stres proteinlerinin ve immünomodülatör yapısal bileşenlerin korunmasına yardımcı olabilir.	Isıl işlem, ısı olmayan teknolojiler kadar yumuşak inaktivasyon profili sağlayamayabilir ve immünomodülatör etkinlik azalabilir.

Bu sınırlılıklar nedeniyle, konvansiyonel ısıtma çoğu zaman yumuşatılmış ısıl işlem (mild-heat), kombine prosesler (termal işlem + ultrason, termal işlem + yüksek basınç) veya ohmik ısıtma gibi yeni teknolojilerle desteklenerek paraprobiyotik formun fonksiyonel bütünlüğünün maksimum düzeyde korunması hedeflenmektedir (Zorzella ve ark., 2023).

Ohmik Isıtma

Ohmik ısıtma (Joule Isıtma), gıda matrisi içerisinde alternatif (AC) veya doğru (DC) akım geçirilmesiyle, ürünün kendi elektriksel direncine bağlı olarak iç hacminde Joule ısısı üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde ısı, harici bir kaynaktan iletmek yerine doğrudan ürünün yapısında olduğu için, konvansiyonel ısıtmaya kıyasla çok daha hızlı, homojen ve hassas biçimde kontrol edilebilir bir ısınma profili sağlar (Ramaswamy ve ark., 2014). Paraprobiyotik üretimi açısından değerlendirildiğinde, ohmik ısıtma; düşük sıcaklık gradyentleri, hızlı ısınma hızı ve elektrik alanın hücre yüzeyinde yarattığı ek fiziksel stres nedeniyle klasik ısıl işlemlere göre daha avantajlı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikler, hücre morfolojisinin ve

immünomodülatör yüzey bileşenlerinin korunmasında potansiyel üstünlük sağlamaktadır (Alkanan ve ark., 2021).

Ohmik inaktivasyon sonrası hücre duvarı, zarf yapısı, yüzey proteinleri ve LTA-peptidoglikan gibi immünolojik açıdan kritik bileşenlerin konvansiyonel ısıtmaya göre daha yüksek oranda korunması, bu yöntemin paraprobiyotik üretiminde fonksiyonel yüzey motiflerinin stabilitesini artırabileceğini göstermektedir (Varghese ve ark., 2014).

Tablo 3. Konvansiyonel Isıl İşlemin Avantajları ve Sınırlılıkları

Kategori	Avantajlar	Kısıtlar (Mühendislik ve Kalite)
Isı Transferi ve Kontrol	Homojen Isınma: Sıcaklık gradyentleri düşüktür; bu sayede mikrobiyal inaktivasyon tüm hacimde tutarlı olur.	Elektriksel İletkenlik Duyarlılığı: Ürünün elektriksel iletkenliği (tuz, şeker içeriği) ısınma hızını doğrudan etkiler ve formülasyon kontrolü gerektirir.
	Kontrollü Etki: Elektrik alanın yarattığı ek stres (elektroporatif etki) ile sadece ısıl değil, aynı zamanda fiziksel stres de uygulanır; bu, hücre yüzey yapılarının korunmasını destekler.	Elektrik Alan Optimizasyonu: Yüksek veya uzun süreli elektrik alan şiddetleri, hücre yüzeyinde istenenden fazla yapısal bozulmaya yol açabilir; voltaj ve frekans optimizasyonu kritiktir.
İşlem Verimliliği	Daha Kısa İşlem Süresi: Hedef sıcaklığa çok hızlı ulaşılması, toplam ısıl yükü azaltır ve ısıya duyarlı fraksiyonların (LTA, yüzey proteinleri) bozulmasını sınırlar.	Elektrot Etkileşimi: Elektrot materyali ve elektro-kimyasal reaksiyonlar yönetilmezse, metal iyon salınımı ve ürün kalitesinde olumsuz

		etkiler oluşabilir (Castro vd., 2004).
	Matris Esnekliği: Sıvı, yarı katı ve partikül içeren sistemlerde dahi uygulanabilir (fermente ürünler, püreler vb.).	Yatırım Maliyeti: Başlangıç ekipman maliyeti, geleneksel ısıtma sistemlerine kıyasla daha yüksek olabilir (genel bir kısıt).
	Yüksek Enerji Verimliliği: Isı kayıplarının azalması, operasyonel enerji maliyetini düşürür.	
Paraprobiyotik Kalitesi	Fonksiyonel yüzey bileşenlerinin ve immünomodülatör yapıların (LTA, Peptidoglikan) daha yüksek oranda korunabileceği öne sürülmektedir.	

(Castro ve ark., 2004; Icier ve Ilıcalı, 2005; Sarang ve ark., 2008; Kaur ve Singh, 2016).

Genel olarak değerlendirildiğinde, ohmik ısıtma; daha homojen ısıl profil, daha kısa işlem süresi ve elektrik alanının sağladığı ek mikrobiyal stres avantajları sayesinde, paraprobiyotik üretimi için konvansiyonel ısıl işlemlere göre daha kontrollü ve fonksiyonel bütünlük açısından daha avantajlı bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Isıl Olmayan İnaktivasyon Teknolojileri

Isıl olmayan inaktivasyon teknolojileri, gıda mühendisliğinde duyu kaliteyi koruma, besin ögesi kayıplarını azaltma ve mikrobiyal güvenliği artırma amacıyla geliştirilmiş ileri işlem yöntemleridir. Bu teknolojiler, mikrobiyal hücrelerin yapısal ve fonksiyonel bütünlüğünü bozan etkileri ısı uygulamadan veya yalnızca minimal sıcaklık artışıyla gerçekleştirir. Böylece geleneksel ısıl işlemlerde görülen protein denatürasyonu, vitamin kaybı veya tekstürel bozulma gibi istenmeyen etkiler en aza indirilir (Knorr ve ark., 2011; Misra ve ark., 2011).

Paraprobiyotik üretimi açısından ısı olmayan teknolojilerin en büyük avantajı, mikroorganizmaların canlılığını ortadan kaldırırken hücresel morfolojiyi ve yüzey yapılarının fonksiyonel bütünlüğünü büyük ölçüde koruyabilmeleridir. Bu yöntemler, hücre ölümünü membran permeabilitesi değişimi, basınç etkisi, elektrik alan uygulaması, reaktif oksijen türleri veya mekanik stres gibi ısı olmayan mekanizmalarla gerçekleştirir. Bu nedenle hücre duvarı, peptidoglikan tabakası, yüzey proteinleri, EPS ve LTA gibi immünomodülatör bileşenler ısı proselere kıyasla daha stabil kalır (Piqué ve ark., 2019; Patrignani ve Lanciotti, 2016).

Hücre yapılarının bu şekilde korunması, paraprobiyotiklerin hedeflenen biyolojik etkilerini (ör. immün modülasyon, antienflamatuvar etki, bağırsak bariyerini güçlendirme) sürdürebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle yüksek hidrostatik basınç, ultrasonik kavitasyon, vurgulu elektrik alan, LED/UV tabanlı fotodinamik inaktivasyon, soğuk plazma ve süper kritik CO₂ gibi non-termal yöntemler paraprobiyotik üretiminde gelecek vadede teknolojiler olarak değerlendirilmektedir (de Almada ve ark., 2022).

Yüksek Hidrostatik Basınç

Yüksek Hidrostatik Basınç (YHB), genellikle 200–600 MPa aralığında uygulanan, basıncın ürünün tüm hacmine izostatik olarak eşit dağılması prensibine dayanan ileri bir gıda işleme teknolojisidir. YHB, mikrobiyal inaktivasyonu ağırlıklı olarak hücre membranının bütünlüğünü bozarak, enzimatik aktiviteleri değiştirerek ve zayıf moleküler etkileşimleri etkileyerek gerçekleştirir (Considine ve ark., 2008).

Paraprobiyotik üretim açısından YHB'nin en kritik özelliği, kovalent bağları etkilememesi nedeniyle proteinlerin birincil kimyasal yapısını korurken, hidrojen, hidrofobik ve iyonik bağlara dayalı daha zayıf etkileşimleri hedef almasıdır. Bu sayede hücre canlılığı ortadan kalkarken, yüzey yapıları ve immünomodülatör bileşenler büyük ölçüde korunabilmektedir Patrignani ve Lanciotti, 2016).

Yüksek Hidrostatik Basınç (YHB), paraprobiyotik üretiminde hücresel bileşenlerin korunumu açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Termal işlemlerden farklı olarak YHB, yüksek sıcaklık oluşturmada etki gösterdiği için proteinlerin birincil yapısında bozulma meydana gelmez. Her ne kadar ikincil ve üçüncül yapılarda sınırlı düzeyde konformasyon değişiklikleri oluşabilse de, bu değişimler termal denatürasyona kıyasla oldukça hafiftir ve paraprobiyotik etkiyle ilişkili yüzey proteinlerinin fonksiyonel bütünlüğünün korunmasına olanak tanır (Considine ve ark., 2008). Ayrıca yüksek basınç

uygulaması, hücre membranında geçici veya kalıcı porlar oluşturarak permeability'yi artırır. Bu durum, nükleotidler, DNA parçacıkları ve sitozolik proteinler gibi sitoplazmik bileşenlerin dışarıya daha kolay salınmasına olanak tanır ve bu moleküllerin immünomodülatör potansiyelini güçlendirebileceği öne sürülmektedir (Patrignani ve Lanciotti, 2016).

YHB'nin bir diğer önemli avantajı, ısı stresa duyarlı peptidoglikan fraksiyonları, lipoteikoik asit (LTA) ve yüzey proteinleri gibi antijenik yapılarda yüksek düzeyde stabilitenin sağlanabilmesidir. Bu immünolojik açıdan kritik moleküllerin korunumu, inaktive edilen hücrelerin bağışıklık sistemiyle etkileşim kurabilme kapasitesinin devam etmesi açısından temel bir faktördür (Siciliano ve Reale, 2021).

Ultrasonik Kaviteasyon

Ultrasonik kaviteasyon, genellikle 20–40 kHz aralığında uygulanan yüksek frekanslı ses dalgalarının sıvı ortamda kaviteasyon kabarcıkları oluşturması prensibine dayanır. Bu kabarcıkların anlık olarak çökmesi sonucunda oluşan mikrojetler, şok dalgaları ve lokal sıcaklık–basınç patlamaları, mikroorganizmalar üzerinde güçlü mekanik etkiler oluşturarak inaktivasyona yol açar. Bu mekanik enerji aktarımı, paraprobiyotik üretiminde özellikle avantajlıdır çünkü hücre canlılığı ortadan kaldırılırken hücre duvarı ve yüzey yapılarının makro bütünlüğü büyük ölçüde korunur (Piyasena ve ark., 2003).

Ultrasonik kaviteasyon sırasında kabarcık çökmesiyle oluşan lokal sıcaklık ve basınç mikro patlamaları, hücre zarında ve duvarında kontrollü düzeyde hasar oluşturarak inaktivasyona yol açar; ancak bu etkiler hücrenin tamamen parçalanmasına neden olmaz ve morfolojik bütünlük büyük ölçüde korunur (Piyasena ve ark., 2003). Bu süreçte ortaya çıkan mekanik stres, hücre zarının geçirgenliğini artırarak membran stabilitesinin bozulmasına ve metabolik aktivitelerin durmasına neden olur. Ayrıca orta düzey ultrason uygulamalarının, hücre yüzeyindeki immünomodülatör proteinlerin ve PAMP yapılarının daha fazla açığa çıkmasına katkı sağlayabileceği bildirilmiştir; bu da paraprobiyotik etkinliği artırabilecek bir yapısal modifikasyon olarak değerlendirilmektedir (Chemat ve ark., 2011).

Yüksek Basıncılı Homojenizasyon (HPH) ve Mikroakışkanlaştırma

Yüksek Basıncılı Homojenizasyon (HPH) ve mikroakışkanlaştırma, mikroorganizmaların dar bir nozülünden 50–300 MPa basınç altında yüksek hızla geçirilmesiyle gerçekleşen yoğun mekanik stres, türbülans, kesme kuvveti ve kaviteasyon etkileri sonucunda inaktive edilmesini sağlayan non-termal teknolojilerdir. Bu işlem sırasında hücreler ani basınç düşüşü, hız gradyanları

ve kütleli kayma kuvvetlerine maruz kalarak zar bütünlüğünü kaybeder, metabolik aktiviteleri durur ve canlılıklarını yitirir; ancak tamamen parçalanmadıkları için yapısal bütünlük büyük ölçüde korunabilir (Patrignani ve Lanciotti, 2016). HPH'nin paraprobiyotik üretimi için önemli görülmesinin nedeni, bu mekanik süreçlerin hücre yüzeyinde kontrollü yapısal değişim oluşturarak yüzey proteinlerinin, peptidoglikan fraksiyonlarının ve immünomodülatör bileşenlerin daha erişilebilir hâle gelmesini sağlamasıdır. Termal yöntemlerin aksine HPH, düşük sıcaklıklarda uygulanabildiği için yüzey antijenlerinin denatürasyon riski oldukça düşüktür. Ayrıca bu teknoloji sürekli üretime uygun olması, yüksek enerji verimliliği, özelleştirilebilir basınç kademeleri ve sıvı gıdalarda kolay uygulanabilirliği nedeniyle özellikle süt ürünleri, bitkisel içecekler, fermente içecekler ve probiyotik takviye ürünlerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Literatürde, HPH'nin laktik asit bakterilerinde canlılığı etkili bir şekilde ortadan kaldırırken hücreli morfolojiyi ve fonksiyonel yüzey yapısının bütünlüğünü koruduğu, bu nedenle paraprobiyotik formülasyonlarda geleneksel ısı işlemlere kıyasla çok daha uygun bir yaklaşım sunduğu belirtilmektedir (Patrignani ve Lanciotti, 2016).

Vurgulu Elektrik Alan

Vurgulu Elektrik Alan (PEF), mikroorganizmaların çok kısa süreli ancak yüksek voltajlı elektrik darbelerine maruz bırakılmasıyla hücre membranında “elektroporasyon” adı verilen geçirgenlik artışının oluşturulduğu ileri bir non-termal inaktivasyon teknolojisidir. Mikro-saniye ölçeğindeki darbeler, hücre zarının dielektrik dayanımını aşarak membranda geçici veya kalıcı porların oluşmasına yol açar; bu porlar iyon dengesinin bozulması, membran potansiyelinin çökmesi ve metabolik aktivitenin durmasıyla sonuçlanarak hücre canlılığını ortadan kaldırır (Toepfl ve ark., 2007; Raso ve ark., 2022).

PEF'in paraprobiyotik üretimi açısından en önemli avantajı, ısıya bağlı protein denatürasyonuna yol açmaması ve işlem sırasında oluşan sıcaklık artışının minimal olmasıdır. Bu sayede hücre duvarı, yüzey proteinleri, peptidoglikan tabakası ve LTA gibi immünomodülatör bileşenler yapısal bütünlüklerini büyük ölçüde korur. Literatürde PEF uygulamasının laktik asit bakterileri de dahil olmak üzere birçok probiyotik türde canlılığı etkili bir şekilde ortadan kaldırırken hücreli morfolojiyi ve yüzey antijenlerini koruduğu, bu nedenle paraprobiyotik üretimi için uygun bir yöntem olduğu bildirilmektedir (Mohamed and Eissa, 2012).

LED / UV Tabanlı Fotodinamik İnaktivasyon

LED/UV tabanlı fotodinamik inaktivasyon, fotosensitizer-ışık-oksijen üçlü etkileşimi sonucunda tekil oksijen ($^1\text{O}_2$), hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) ve süperoksit ($\text{O}_2\bullet^-$) gibi reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşmasına dayanır. Bu ROS molekülleri mikroorganizmaların zar yapıları, proteinleri ve nükleik asitleri üzerinde oksidatif stres oluşturarak hücresel canlılığın ortadan kalkmasına yol açar. Yöntemin paraprobiyotik üretimi için cazip olmasının temel nedeni, ışık temelli inaktivasyonun ortam sıcaklığında anlamlı bir artış oluşturmaması ve böylece termal hasar riskini ortadan kaldırarak hücre duvarı ile yüzey proteinlerinin büyük ölçüde korunmasına olanak tanımasıdır. Ayrıca LED ışık kaynaklarının düşük enerji tüketimi, düşük ısı yükü ve spesifik dalga boylarının hassas biçimde kontrol edilebilmesi, fotodinamik uygulamayı fonksiyonel bileşenlerin korunmasının kritik olduğu gıda sistemlerinde avantajlı kılmaktadır (Jori ve ark., 2006).

Fotodinamik inaktivasyonun biyofilmleri parçalama, hücre yüzeyindeki yapıları değiştirerek mikrobiyal tutunmayı azaltma ve patojenlerin membran bütünlüğünü hedefleme açısından etkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Wainwright ve ark., 2017). Bu özellikler, fotodinamik yöntemi hem sıvı hem de yüzey uygulamalarında paraprobiyotik üretimine uygun, güvenli ve non-termal bir teknoloji hâline getirmektedir.

Soğuk Plazma

Soğuk plazma, atmosferik basınç altında üretilen ve iyonlar, radikaller, serbest elektronlar, ozon, nitrik oksit türevleri (RNS) ve UV fotonlarını içeren yüksek reaktif bir gaz fazıdır. Bu reaktif türler, mikroorganizmalar üzerinde hücre zarının oksidatif hasara uğraması, DNA’da baz modifikasyonları ve kırıkların oluşması, enzimatik yapıların bozulması gibi çok yönlü etkiler oluşturarak inaktivasyona yol açar. Soğuk plazmanın en önemli avantajı, işlem sıcaklığının düşük olması nedeniyle protein denatürasyonu veya ısıl bozulma oluşturmada mikrobiyal inaktivasyon gerçekleştirebilmesidir. Bu özellik, paraprobiyotik üretimi açısından kritik olan yüzey proteinleri, peptidoglikan tabakası ve ekstraselüler polisakkarit (EPS) gibi yapıların belirli işlem koşullarında büyük ölçüde korunabilmesine olanak sağlar (Niemira, 2012; Birania, ve ark., 2022).

Ayrıca soğuk plazmanın ambalaj içerisindeki ürünlere uygulanabilmesi, özellikle doğrudan temasın sınırlı olduğu katı gıdalarda, tabletlerde veya kaplamalı hücre sistemlerinde paraprobiyotik üretimi için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde soğuk plazmanın, düşük sıcaklıkta çalışması, kısa işlem süreleri ve yüksek yüzey etkileşim kapasitesi sayesinde paraprobiyotik

hücre yapılarının morfolojik bütünlüğünü koruyabildiği ve non-termal inaktivasyon teknikleri arasında geleceğe yönelik güçlü bir alternatif olduğu belirtilmektedir (Misra ve ark., 2011; Niemira, 2012).

Süperkritik CO₂ Prosesleri

Süperkritik CO₂ (SC-CO₂), kritik noktasının üzerinde (31,1 °C ve 7.38 MPa) hem gaz hem de sıvı özelliklerini bir arada gösteren bir akışkan olup, mikroorganizmaların inaktivasyonunda yüksek sıcaklık gerektirmeyen gelişmiş bir non-termal proses olarak kullanılmaktadır. SC-CO₂'nin mikroorganizmaları inaktive etme mekanizması çok yönlüdür: CO₂, hücre membranına difüze olarak lipid çift tabakasının akışkanlığını bozmakta; hücre içi sulu fazda karbonik asit oluşumu nedeniyle pH düşmekte; basınç değişimleri ise membranda gerilme, por oluşumu ve geçirgenlik artışına yol açmaktadır. Bu mekanizmalar sonucunda hücre canlılığı ortadan kalkarken, işlem sıcaklığının düşük kalması sayesinde termal denatürasyon oluşmaz ve mikroorganizmanın yüzey proteinleri, peptidoglikan tabakası, lipoteikoik asit (LTA) ve diğer immünomodülatör yapıları büyük ölçüde korunur (Dillow ve ark., 1999; Garcia-Gonzalez ve ark., 2007). Bu durum, SC-CO₂ yöntemini paraprobiyotik üretimi için özellikle uygun hâle getirmektedir.

SC-CO₂'nin bir diğer önemli avantajı, kimyasal çözücü kullanılmaması ve işlem sonrası hiçbir kalıntı bırakmamasıdır. Dolayısıyla gıda uygulamalarında temiz, güvenli ve sürdürülebilir bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Spilimbergo ve Bertucco, 2003). Yapılan çalışmalar, SC-CO₂ işleminin hücre duvarı bütünlüğünü koruyarak kontrollü inaktivasyon sağladığını, protein yapılarına minimal zarar verdiğini ve morfolojik stabilitenin büyük ölçüde sürdürülebildiğini göstermektedir. Bu özellikler, paraprobiyotik amaçlarla kullanılacak bakteri hücrelerinin fonksiyonel yüzey motiflerini koruması açısından kritik önem taşımaktadır (Molina-Höppner ve ark., 2004; Zhang ve ark., 2006).

Tüm bu mekanistik ve teknolojik avantajlar göz önüne alındığında SC-CO₂, hem ısıl bozulmayı önlemesi hem de yüzey antijenlerini ve immünomodülatör bileşenleri koruyarak yüksek kalite düzeyinde inaktive hücreler üretebilmesi nedeniyle paraprobiyotik formülasyonlar için en umut verici non-termal teknolojilerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 4. Paraprobiyotik Üretiminde Isıl Olmayan İnaktivasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Teknoloji	Temel Mekanizma	Hücrel Yapılara Etkisi	Paraprobiyotik Açısından Avantajları	Anahtar Referans
Ultrasonik Kavitasyon	Kavitasyon kabarcıklarının çökmesi ile mikrojetler, şok dalgaları, lokal sıcaklık–basınç artışı	Hücre zarında kontrollü hasar, geçirgenlik artışı; yüzey morfolojisi kısmen bozulur, bütünlük korunur	Yüzey proteinleri ve PAMP yapıları daha fazla açığa çıkar; sıvı gıdalarda etkin	Piyasena ve ark., 2003
Yüksek Basıncılı Homojenizasyon (HPH)	50–300 MPa basınç altında dar nozülünden geçiş → kesme kuvveti, türbülans, kavitasyon	Zar bütünlüğü bozulur; hücre duvarı ve yüzey proteinleri korunur, kontrollü yüzey modifikasyonu	Sürekli üretime uygun, düşük sıcaklık etkisi, yüksek enerji verimliliği	Patrignani ve Lanciotti, 2016; Paniwnyk, 2017
Pulsed Electric Field (PEF)	Mikro saniyelik yüksek voltaj darbeleri → membranda elektroporasyon	Hücre canlılığı kaybolur; yüzey proteinleri ve duvar yapıları büyük ölçüde korunur	Termal hasar yok; sıvı içeceklerde endüstriyel uygulanabilirlik yüksek	Abram ve ark., 2003
LED / UV Fotodinamik İnaktivasyon	Fotosensitizer + ışık + oksijen → ROS üretimi	Genelde membran ve biyofilm yapıları	Termal hasar yok; düşük enerji tüketimi,	Sabino ve ark., 2023

	($^1\text{O}_2$, $\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$)	hedef alınır; hücre duvarında minimal değişim	biyofilm kırıcı etki	
Soğuk Plazma	Plazma iyonları, radikaller, elektronlar ve UV fotonları ile oksidatif stres	Zar oksidasyonu, DNA hasarı; düşük sıcaklıkta yüzey proteinleri kısmen korunur	Ambalaj içinde uygulanabilir; yüzey uygulamaları için ideal	Misra ve ark., 2011; Niemira, 2012
Süperkritik CO_2 (SC- CO_2)	Membran lipidlerine difüzyon, pH düşmesi, basınç kaynaklı permeabilite artışı	Membran akışkanlığı bozulur; yüzey proteinleri ve peptidoglikan büyük ölçüde korunur	Çözücü kalıntısı yok; düşük sıcaklık; yüksek yapısal korunum	Spilimbergo ve Bertucco, 2003; Pasdar ve ark., 2024

SONUÇ

Paraprobiyotik üretimi, klasik probiyotik teknolojilerinden farklı olarak mikroorganizmanın kontrollü inaktivasyonu ile hücresel morfolojinin ve immünolojik olarak anlamlı yüzey yapılarının korunması gereksinimine dayanır. Bu nedenle kullanılacak inaktivasyon yönteminin seçimi, yalnızca mikrobiyal ölüm oranına değil, aynı zamanda yapısal bütünlük, fonksiyonel yüzey motiflerinin stabilitesi, enerji verimliliği, proses ölçeklenebilirliği ve ürün matrisine uyum gibi çok boyutlu mühendislik kriterlerine bağlıdır.

Isıl prosesler (konveksiyonel ısıtma işlem ve ohmik ısıtma), paraprobiyotik üretiminde hâlen temel yaklaşım olmaya devam etmekle birlikte, ısıya duyarlı yüzey proteinleri ve PAMP yapılarında denatürasyon riski taşımaktadır. Konveksiyonel ısıtma işlem, basitliği ve uygulanabilirliğine rağmen sıcaklık gradyanları ve ısı yük kaynaklı yapısal kayıplar nedeniyle sınırlı avantaj sunarken, ohmik ısıtma daha homojen ısı transfer ve elektrik alan etkisi

nedeniyle daha iyi yüzey koruması sağlayan gelişmiş bir ısıt teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Isıl olmayan prosesler, paraprobiyotik üretiminde yapısal bütünlük–inaktivasyon dengesi açısından en elverişli teknolojik araçları temsil eder. Yüksek hidrostatik basınç, kovalent bağlara zarar vermeden membran ve enzim düzeyinde biyofiziksel değişiklikler oluşturması sayesinde en yüksek morfolojik korunum sağlayan yöntemlerden biridir. Ultrasonik kavitasyon ve yüksek basınçlı homojenizasyon, hücre yüzeyinde kontrollü mekanik stres oluşturarak fonksiyonel yüzey proteinlerinin daha fazla açığa çıkması gibi paraprobiyotik etkiyi güçlendiren ek avantajlar sunar.

Genel olarak değerlendirildiğinde, paraprobiyotik üretiminde inaktivasyon teknolojilerinin başarısı, canlılık kaybı ile yapısal korunum arasındaki mühendislik optimizasyonuna bağlıdır. Isıl yöntemler temel yaklaşımı oluşturmakla birlikte, non-termal prosesler yüksek fonksiyonellik, minimal yapısal hasar ve ürün matrisine uyurlanabilirlik açısından en uygun teknolojik platformu sunmaktadır. Bu nedenle gelecekte paraprobiyotik üretiminde, proses entegrasyonu, çoklu bariyer teknolojileri (hurdle approach) ve matris–temelli optimizasyonların artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abram, F., Smelt, J. P. P. M., Bos, R., & Wouters, P. C. (2003). Modelling and optimization of inactivation of *Lactobacillus plantarum* by pulsed electric field treatment. *Journal of Applied Microbiology*, 94(4), 571-579 <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01869.x>
- Adams, C. A. (2010). The probiotic paradox: live and dead cells are biological response modifiers. *Nutrition research reviews*, 23(1), 37-46. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000090>
- Akter, S., Park, J. H., & Jung, H. K. (2020). Potential health-promoting benefits of paraprobiotics, inactivated probiotic cells. *Journal of microbiology and biotechnology*, 30(4), 477. <https://doi.org/10.4014/jmb.1911.11019>
- Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R., Watson, D. G., & Pratap-Singh, A. (2021). Ohmic heating in the food industry: Developments in concepts and applications during 2013–2020. *Applied sciences*, 11(6), 2507. <https://doi.org/10.3390/app11062507>
- Almada, C. N., Almada-Erix, C. N., Roquette, A. R., Santos-Junior, V. A., Cabral, L., Noronha, M. F., ... & Sant'Ana, A. S. (2021). Paraprobiotics obtained by six different inactivation processes: Impacts on the biochemical parameters and intestinal microbiota of Wistar male rats. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(8), 1057-1070. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1906211>
- Barros, C. P., Pires, R. P., Guimarães, J. T., Abud, Y. K. D., Almada, C. N., Pimentel, T. C., Silva, M. C., Freitas, M. Q., Sant'Ana, A. S., & Cruz, A. G. (2020). Paraprobiotics and postbiotics: Concepts and potential applications in dairy products. *Current Opinion in Food Science*, 32, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.003>
- Birania, S., Attkan, A. K., Kumar, S., Kumar, N., & Singh, V. K. (2022). Cold plasma in food processing and preservation: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14110. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14110>
- Castro, I., Teixeira, J. A., Salengke, S., Sastry, S. K., & Vicente, A. A. (2004). Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(1), 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.11.001>
- Chemat, F., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(4), 813-835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Considine, K. M., Kelly, A. L., Fitzgerald, G. F., Hill, C., & Sleator, R. D. (2008). High-pressure processing–Effects on microbial food safety and

- food quality. *FEMS Microbiology Letters*, 281(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01084.x>
- de Almada, C. N., Almada, C. N., Martinez, R. C. R., & Sant'Ana, A. S. (2022). Paraprobiotics: Evidences on their ability to modify biological responses, safety aspects, and applications in food and health. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 601–616. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.011>
- Dillow, A. K., Dehghani, F., Hrkach, J. S., Foster, N. R., & Langer, R. (1999). Bacterial inactivation by using near-and supercritical carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(18), 10344–10348. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.18.10344>
- Garcia-Gonzalez, L., Geeraerd, A. H., Spilimbergo, S., Elst, K., Van Ginneken, L., Debevere, J., ... & Devlieghere, F. (2007). High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: the past, the present and the future. *International journal of food microbiology*, 117(1), 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.02.018>
- Icier, F., & Ilicali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food research international*, 38(10), 1135–1142. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.04.003>
- Jori, G., Fabris, C., Soncin, M., Ferro, S., Coppellotti, O., Dei, D., ... & Roncucci, G. (2006). Photodynamic therapy in the treatment of microbial infections: basic principles and perspective applications. *Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery*, 38(5), 468–481.
- Kaur, N., & Singh, A. K. (2016). Ohmic heating: Concept and applications—A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(14), 2338–2351. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.835303>
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annual review of food science and technology*, 2(1), 203–235. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124129>
- Misra, N. N., Tiwari, B. K., Raghavarao, K. S. M. S., & Cullen, P. J. (2011). Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Engineering Reviews*, 3(3), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9041-9>
- Mohamed, M. E., & Eissa, A. H. A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In *Structure and function of food engineering*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/48678>

- Molina-Höppner, A., Doster, W., Vogel, R. F., & Gänzle, M. G. (2004). Protective effect of sucrose and sodium chloride for *Lactococcus lactis* during sublethal and lethal high-pressure treatments. *Applied and environmental microbiology*, 70(4), 2013-2020. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.4.2013-2020.2004>
- Monteiro, S. S., Schnorr, C. E., & Pasquali, M. A. D. B. (2023). Paraprobiotics and postbiotics—current state of scientific research and future trends toward the development of functional foods. *Foods*, 12(12), 2394. <https://doi.org/10.3390/foods12122394>
- Nataraj, B. H., Ali, S. A., Behare, P. V., & Yadav, H. (2020). Postbiotics-parabiotics: The new horizons in microbial biotherapy and functional foods. *Microbial cell factories*, 19(1), 168. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01426-w>
- Niemira, B. A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. *Annual review of food science and technology*, 3(1), 125-142. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101132>
- Pasdar, N., Mostashari, P., Greiner, R., Khelfa, A., Rashidinejad, A., Eshpari, H., ... & Roohinejad, S. (2024). Advancements in non-thermal processing technologies for enhancing safety and quality of infant and baby food products: A review. *Foods*, 13(17), 2659. <https://doi.org/10.3390/foods13172659>
- Patrignani, F., & Lanciotti, R. (2016). Applications of high and ultra high pressure homogenization for food safety. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1132. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01132>
- Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 794-806. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.025>
- Piqué, N., Berlanga, M., & Miñana-Galbés, D. (2019). Health benefits of heat-killed (Tyndallized) probiotics: an overview. *International journal of molecular sciences*, 20(10), 2534. <https://doi.org/10.3390/ijms20102534>
- Pimentel, T. C., Cruz, A. G., Pereira, E., da Costa, W. K. A., da Silva Rocha, R., de Souza Pedrosa, G. T., ... & Magnani, M. (2023). Postbiotics: An overview of concepts, inactivation technologies, health effects, and driver trends. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 199-214. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.009>
- Piyasena, P., Mohareb, E., & McKellar, R. C. (2003). Inactivation of microbes using ultrasound: a review. *International journal of food microbiology*, 87(3), 207-216. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00075-8)

- Ramaswamy, H. S., Marcotte, M., Sastry, S., & Abdelrahim, K. (Eds.). (2014). *Ohmic heating in food processing*. CRC press.
- Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Sabino, C. P., Ribeiro, M. S., Wainwright, M., Dos Anjos, C., Sellera, F. P., Dropa, M., ... & Baptista, M. S. (2023). The biochemical mechanisms of antimicrobial photodynamic therapy. *Photochemistry and photobiology*, 99(2), 742-750. <https://doi.org/10.1111/php.13685>
- Sarang, S., Sastry, S. K., & Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.012>
- Sheng, L., Li, X., & Wang, L. (2022). Photodynamic inactivation in food systems: A review of its application, mechanisms, and future perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.001>
- Siciliano, R. A., Reale, A., Mazzeo, M. F., Morandi, S., Silveti, T., & Brasca, M. (2021). Paraprobiotics: A new perspective for functional foods and nutraceuticals. *Nutrients*, 13(4), 1225. <https://doi.org/10.3390/nu13041225>
- Sionek, B., & Gantner, M. (2025). Probiotics and Paraprobiotics—New Proposal for Functional Food. *Applied Sciences*, 15(1), 366. <https://doi.org/10.3390/app15010366>
- Spilimbergo, S., & Bertucco, A. (2003). Non-thermal bacterial inactivation with dense CO₂. *Biotechnology and Bioengineering*, 84(6), 627-638. <https://doi.org/10.1002/bit.10783>
- Taverniti, V., & Guglielmetti, S. (2011). The immunomodulatory properties of probiotic microorganisms beyond their viability (ghost probiotics: proposal of paraprobiotic concept). *Genes & nutrition*, 6(3), 261-274. <https://doi.org/10.1007/s12263-011-0218-x>
- Teame, T., Wang, A., Xie, M., Zhang, Z., Yang, Y., Ding, Q., ... & Zhou, Z. (2020). Paraprobiotics and postbiotics of probiotic Lactobacilli, their positive effects on the host and action mechanisms: A review. *Frontiers in nutrition*, 7, 570344. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.570344>
- Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical engineering and processing: Process intensification*, 46(6), 537-546. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.07.011>
- Vallejo-Cordoba, B., Castro-López, C., García, H. S., González-Córdova, A. F., & Hernández-Mendoza, A. (2020). Postbiotics and paraprobiotics: A

- review of current evidence and emerging trends. *Advances in food and nutrition research*, 94, 1-34. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.06.001>
- Van Boekel, M. A. (2008). Kinetic modeling of food quality: a critical review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 7(1), 144-158. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x>
- Varghese, K. S., Pandey, M. C., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *Journal of food science and technology*, 51(10), 2304-2317. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0710-3>
- Wainwright, M., Maisch, T., Nonell, S., Plaetzer, K., Almeida, A., Tegos, G. P., & Hamblin, M. R. (2017). Photoantimicrobials—are we afraid of the light?. *The Lancet Infectious Diseases*, 17(2), e49-e55. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30268-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30268-7)
- Yolmeh, M., Xavier-Santos, D., & Sant'Ana, A. S. (2024). Modulating gut microbiota by paraprobiotics: Mechanisms, advantages, and challenges. *Food Bioscience*, 60, 104305. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104305>
- Zhang, J., Davis, T. A., Matthews, M. A., Drews, M. J., LaBerge, M., & An, Y. H. (2006). Sterilization using high-pressure carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 38(3), 354-372. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2005.05.005>

BÖLÜM 8

GIDA ATIKLARININ DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE DÖNGÜSEL BİYOTEKNOLOJİ

Öğr. Gör. Esen Bilge BİÇER ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18146595>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Zara Ahmet Çuhadaroğlu MYO, Gıda İşleme Bölümü, Türkiye
bbicer@cumhuriyet.edu.tr Orcid ID: 0000-0003-0500-8303.

GİRİŞ

Gıda endüstrisi, hammadde tedarikinden ürün işleme, depolama, dağıtım ve tüketime kadar uzanan çok aşamalı yapısıyla önemli miktarda gıda kaybı ve atığının oluşmasına neden olmaktadır. FAO verileri, küresel gıda kaybının boyutunu gözler önüne sermektedir: Her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton gıda israf edilmekte, bu da toplam üretilen gıdanın yaklaşık üçte birine denk gelmektedir (FAO, 2011; FAO, 2019). Gıda atıkları, doğrudan ekonomik kayıplara yol açmasının yanı sıra; artan sera gazı emisyonları, su ve toprak kaynakları üzerinde ciddi ekolojik baskılar, besin zinciri sürdürülebilirliğinde zayıflama ve yüksek atık yönetimi maliyetleri şeklinde çok boyutlu çevresel etkilere neden olan küresel bir sorundur (Garcia-Garcia ve ark., 2017; Patinha ve ark., 2017). Bu nedenle gıda atıklarının etkin biçimde değerlendirilmesi hem sürdürülebilir üretim stratejilerinin hem de döngüsel ekonomi yaklaşımının merkezinde yer alan kritik bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir (Lipinski ve ark., 2013).

Döngüsel ekonomi yaklaşımı, geleneksel “al–üret–tüket–at” modelinin yerine, kaynakların mümkün olan en uzun süre sistem içinde tutulduğu, yeniden değerlendirildiği ve değer zincirine geri kazandırıldığı kapalı döngülü bir üretim anlayışını önermektedir (Geissdoerfer ve ark., 2017; Kirchherr ve ark., 2017). Bu çerçevede, gıda atıklarının fermentasyon, enzimatik hidroliz ve biyorafineri gibi biyoteknolojik süreçlerle platform kimyasallar, biyoyakıtlar ve biyo-bazlı malzemeler dâhil olmak üzere yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesi; döngüsel bioekonomi hedeflerine geçişi destekleyen temel “atık değerlendirme (valorization)” stratejilerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Tsegaye ve ark., 2021; Ezeorba ve ark., 2024; Pal ve ark., 2024). Modern biyoteknolojik süreçler sayesinde gıda atıkları artık bertaraf edilmesi gereken bir yük değil; fonksiyonel bileşiklerin, biyopolimerlerin, biyoenerjinin ve yeni nesil biyomateryallerin üretiminde kullanılabilen değerli girdiler hâline gelmektedir (Liguori ve Faraco, 2016; Gkountani ve Tsoulfas., 2023).

Gıda mühendisliği disiplini, gıda atıklarının döngüsel biyoteknoloji kapsamında değerlendirilmesinde merkezi bir rol üstlenmektedir. Özellikle proses tasarımı ve optimizasyonu, yeşil ekstraksiyon ve ayırma teknolojileri, ürün ve formülasyon geliştirme, yaşam döngüsü analizi (LCA) ile endüstriyel ölçekleme gibi alanlarda sağlanan mühendislik temelli yaklaşımlar, atıkların yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır (Gkountani ve Tsoulfas., 2023; Morone ve ark., 2023). Bu bağlamda gıda mühendisliği, biyoteknolojik dönüşüm süreçlerinin yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel olarak uygulanabilir ve sürdürülebilir sistemler

hâline getirilmesinde kilit bir disiplin olarak öne çıkmaktadır (Mirabella ve ark., 2014).

Döngüsel Biyoteknoloji

Döngüsel biyoteknoloji, biyolojik sistemlerin doğasında bulunan yenilenme, madde ve enerji döngüsü prensiplerinden esinlenen; biyolojik kaynakların minimum kayıpla sistem içinde tutulmasını, yeniden işlevlendirilmesini ve sürdürülebilir biçimde ekonomik ve çevresel değer kazanmasını hedefleyen bütüncül bir teknoloji ve tasarım yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Korhonen ve ark., 2018; Holden ve ark., 2023). Bu yaklaşımda biyokütle ve biyolojik yan ürünler, doğrusal üretim zincirlerinden çıkarılarak kapalı döngülü sistemlere entegre edilmekte ve böylece döngüsel biyoekonomi hedeflerine katkı sağlanmaktadır. Bu perspektifte gıda atıkları, bertaraf edilmesi gereken bir yük ya da çevresel risk unsuru olarak değil, biyokimyasal açıdan zengin alternatif hammaddeler olarak ele alınmaktadır. Böylece “atık” kavramı yeniden tanımlanmakta ve üretim zinciri, lineer bir yapıdan çıkarak biyolojik döngülerin uyumlu bir parçası hâline getirilmektedir (Korhonen ve ark., 2018).

Döngüsel biyoteknoloji uygulamalarında temel amaç, organik kaynakların sistem dışına çıkmadan çoklu ürün elde etmeye yönelik entegre süreçlere yönlendirilmesidir. Bu yaklaşım, biyokütlenin kimyasal, mikrobiyolojik ve enzimatik yollarla kademeli olarak işlenerek yüksek katma değerli ürünlere dönüştürüldüğü biyorefineri modelleri ile desteklenmektedir. Biyorefineri sistemleri sayesinde gıda atıkları; enerji taşıyıcıları, platform kimyasalları, fonksiyonel gıda bileşenleri ve biyopolimerlerin üretiminde alternatif ve sürdürülebilir hammaddeler olarak değerlendirilebilmektedir (Cherubini, 2010; Tsegaye ve ark., 2021).

Buna ek olarak fermentasyon, enzimatik hidroliz ve mikrobiyal biyotransformasyon gibi biyoteknolojik süreçler, geleneksel depolama veya bertaraf yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük çevresel etki, daha yüksek kaynak verimliliği ve ekonomik katma değer sağlayan dönüşüm mekanizmaları sunmaktadır (Liguori ve Faraco, 2016). Bu yönüyle biyoteknolojik valorization yaklaşımları, döngüsel biyoekonominin gıda sistemi içerisindeki temel uygulama alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu sistem yaklaşımı, sürdürülebilir gıda üretiminin ötesinde; endüstriyel simbiyozun geliştirilmesi, enerji ve kaynak verimliliğinin artırılması, karbon ayak izinin azaltılması ve birincil hammadde bağımlılığının düşürülmesi gibi çok boyutlu kazanımlar sağlamaktadır (Korhonen ve ark., 2018; Mirabella ve ark., 2014). Bu bağlamda döngüsel biyoteknoloji, yalnızca atık yönetimine

yönelik yenilikçi bir araç olarak değil; aynı zamanda gıda sektöründe üretim süreçlerinin yeniden tasarlanmasını, kaynak akışlarının optimize edilmesini ve sürdürülebilir değer zincirlerinin oluşturulmasını hedefleyen bütüncül bir sürdürülebilirlik stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Tsegaye ve ark., 2021; Pal ve ark., 2024). Bu model, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil; ekonomik, sosyal ve endüstriyel kazanımları da beraberinde getirir.

Biyorafineri yaklaşımı

Gıda atıklarının biyoteknolojik dönüşümünde en kritik ve bütüncül modellerden biri olan biyorafineriler, petrol rafinerilerinde ham petrolün farklı fraksiyonlara ayrılarak çok sayıda ürün elde edilmesine benzer biçimde, biyokütle ve organik atıkları kademeli, kontrollü ve çok aşamalı prosesler aracılığıyla işleyerek birden fazla yüksek katma değerli ürünün eş zamanlı olarak üretilmesini hedefleyen entegre sistemlerdir (Cherubini, 2010; Tsegaye ve ark., 2021). Bu sistemler sayesinde gıda atıkları yalnızca tek bir nihai ürüne dönüştürülmekle kalmamakta; aynı hammadde üzerinden enerji taşıyıcıları, platform kimyasallar, fonksiyonel gıda bileşenleri ve biyopolimerler gibi farklı ürün fraksiyonları elde edilebilmektedir. Bu yönüyle biyorefineri yaklaşımı, döngüsel biyoteknolojinin gıda endüstrisindeki temel uygulama modellerinden biri olarak kabul edilmektedir (Pal ve ark., 2024).

Bu modelde gıda atıkları, içerdiği kimyasal bileşenler ve biyokimyasal potansiyelleri dikkate alınarak sistematik bir fraksiyonlama ve ayırıştırma sürecine tabi tutulmakta; böylece tek yönlü ve düşük katma değerli bir dönüşüm yerine, çoklu ürün elde etmeye olanak sağlayan entegre bir valorization yaklaşımı benimsenmektedir. Bu yaklaşım sayesinde fonksiyonel bileşikler, gıda içerik bileşenleri, biyopolimerler ve biyoenerji ürünlerini kapsayan geniş bir ürün portföyü elde edilebilmektedir (Liguori ve Faraco, 2016; Tsegaye ve ark., 2021).

Bu kapsamda meyve ve sebze işleme atıkları, polifenoller, flavonoidler ve karotenoidler gibi biyoaktif bileşiklerin geri kazanımı için önemli kaynaklar sunarken; tahıl kökenli atıklar ve posalar pektin, diyet lifi ve protein konsantrelerinin üretiminde değerlendirilebilmektedir. Hayvansal ve deniz ürünleri işleme atıkları ise jelatin, kolajen ve kitozan gibi biyomateryallerin elde edilmesi açısından yüksek bir potansiyele sahiptir. Ayrıca lipid içeriği yüksek atık fraksiyonları biyodizel üretimi için uygun hammaddeler oluştururken; karbonhidratça zengin fraksiyonlar biyoetanol üretiminde, karma organik atık akışları ise anaerobik fermentasyon yoluyla biyogaz üretiminde etkin biçimde kullanılabilmektedir (Cherubini, 2010; Mirabella ve ark., 2014).

Biyorefineri yaklaşımının en önemli avantajı, gıda atıklarının neredeyse tamamının farklı ürün fraksiyonları hâlinde değerlendirilebilmesine olanak tanımasıdır. Bu sayede hem ekonomik verimlilik artırılmakta hem de bertaraf ihtiyacının azalmasına bağlı olarak çevresel yük önemli ölçüde düşürülmektedir. Çoklu ürün elde etmeye dayalı bu bütüncül dönüşüm modeli, kaynak kullanımını optimize eden kapalı döngülü sistemler sunarak döngüsel biyoteknolojinin yapısal temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda biyorefineri yaklaşımı, gıda endüstrisinin sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ve karbon ayak izinin azaltılması gibi stratejik hedeflerine ulaşmasında kilit bir rol üstlenmektedir (Tonini ve ark., 2020).

Endüstriyel simbiyoz ve sıfır atık modeli

Endüstriyel simbiyoz, bir üretim sisteminde ortaya çıkan yan ürünlerin veya atık akışlarının başka bir endüstriyel süreçte ikincil hammadde olarak değerlendirilmesine dayanan ve döngüsel ekonomi yaklaşımının pratikteki en somut ve uygulanabilir modellerinden biri olarak kabul edilmektedir (Chertow, 2000; Korhonen ve ark., 2018). Bu modelde temel amaç, yalnızca tek bir işletme ölçeğinde atık minimizasyonu sağlamakla kalmayıp, endüstriler arası iş birliği ve kaynak paylaşımı yoluyla malzeme ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve çevresel yükü sistematik biçimde azaltmaktır. Gıda endüstrisi, farklı üretim kollarında sürekli ve yüksek hacimlerde, aynı zamanda biyokimyasal açıdan zengin ve dönüştürülebilir atık akışları üretmesi nedeniyle endüstriyel simbiyoz uygulamalarına son derece elverişli bir sektör olarak öne çıkmaktadır. Bu özellik, gıda atıklarının biyoteknolojik süreçlerle yeniden değerlendirilmesini kolaylaştırmakta ve döngüsel biyoteknoloji temelli sistemlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Gıda atıkları, endüstriyel simbiyoz yaklaşımı çerçevesinde ele alındığında, lineer üretim sistemlerinde bertaraf edilmesi gereken bir sorun olmaktan çıkmakta ve farklı endüstriyel sektörler için stratejik ve sürdürülebilir girdilere dönüşmektedir. Bu kapsamda bira üretiminden kaynaklanan arpa posası (*brewer's spent grain*), yüksek lif ve protein içeriği sayesinde fırıncılık ürünlerinde ve fonksiyonel gıda formülasyonlarında değerlendirilebilmekte; meyve suyu endüstrisinde ortaya çıkan kabuk ve posalar ise polifenoller ve pektin gibi değerli bileşiklerin geri kazanımında hammadde olarak kullanılabilir. Benzer şekilde süt endüstrisinde oluşan peyniraltı suyu, fermentasyon süreçlerinde laktik asit üretimi veya biyoplastik hammaddesi olarak değerlendirilebilirken; balık işleme tesislerinden elde edilen deri ve kıkırdak fraksiyonları kolajen ve jelatin üretimi yoluyla yüksek katma değerli biyomateryallere dönüştürülebilmektedir (Mirabella ve ark 2014; Jacobsen ve

ark., 2019). Bu örnekler, gıda endüstrisinde oluşan yan ürün ve atık akışlarının, uygun teknolojik ve biyoteknolojik entegrasyonlarla çok sektörlü değer zincirlerine başarıyla entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Endüstriyel simbiyoz yaklaşımının ileri bir aşamasını temsil eden sıfır atık modeli, üretim süreçlerinde ortaya çıkan tüm madde ve enerji akışlarının ya yeniden üretim döngüsüne kazandırıldığı ya da enerji ve materyal geri kazanımı yoluyla değerlendirildiği entegre sistemleri ifade etmektedir. Bu modelde proses tasarımı, atık oluşumunu en aza indirecek şekilde bütüncül olarak planlanmakta; kaçınılmaz yan ürünler ise biyoteknolojik dönüşüm, biyorafineri veya enerji üretim süreçlerine yönlendirilerek sistem dışına çıkmadan değerlendirilmektedir. Böylece üretim zinciri boyunca kapalı döngü yapısı güçlendirilmekte ve kaynak kullanım etkinliği artırılmaktadır (Korhonen ve ark., 2018).

Sıfır atık yaklaşımı, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmayıp aynı zamanda işletmelerin birincil hammadde gereksinimini azaltmasına, atık yönetimi maliyetlerini düşürmesine ve yan ürünlerin değerlendirilmesi yoluyla yeni ekonomik değer alanları oluşturmaya olanak sağlamaktadır (Mirabella ve ark., 2014). Bu yönüyle sıfır atık modeli, çevresel faydalar ile ekonomik kazanımları eş zamanlı olarak hedefleyen stratejik bir üretim anlayışı sunmaktadır. Bu bağlamda endüstriyel simbiyoz ve sıfır atık modeli, döngüsel biyoteknolojinin gıda endüstrisinde uygulanabilirliğini artıran; kaynak verimliliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk ilkelerini tek bir sistem çerçevesinde bir araya getiren temel yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir (Tsegaye ve ark., 2021).

Gıda Atıklarının Sınıflandırılması

Gıda atıklarının etkin biçimde değerlendirilmesi ve döngüsel biyoteknoloji uygulamalarının başarıyla tasarlanabilmesi, öncelikle bu atıkların kaynağı, fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimi temelinde doğru şekilde sınıflandırılmasına bağlıdır. Gıda atıkları; içerdiği makro ve mikro bileşenler, nem oranı, biyolojik bozunabilirlik düzeyi ve potansiyel kontaminantlar açısından büyük farklılıklar göstermekte olup, bu heterojen yapı uygulanacak biyoteknolojik dönüşüm stratejilerini doğrudan etkilemektedir (Mirabella ve ark., 2014). Bu nedenle literatürde gıda atıkları genel olarak bitkisel kaynaklı, hayvansal kaynaklı ve endüstriyel proses atıkları olmak üzere üç ana grupta ele alınmaktadır.

Bitkisel kaynaklı gıda atıkları, küresel ölçekte oluşan gıda atıklarının en büyük bölümünü oluşturmakta olup, özellikle meyve ve sebze işleme endüstrilerinde yoğunlaşmaktadır. Meyve kabukları, posalar, çekirdekler, yapraklar ve tahıl

kepekleri gibi bitkisel yan ürünler; yüksek oranda diyet lifi, polifenoller, flavonoidler, karotenoidler, pektin ve nişasta içermeleri nedeniyle döngüsel biyoteknoloji uygulamaları açısından önemli bir biyokimyasal potansiyel sunmaktadır (Rifna ve ark., 2023).

Hayvansal kaynaklı gıda atıkları, protein ve lipid içeriği yüksek yan ürünlerden oluşmakta ve genellikle et, süt ve su ürünleri işleme endüstrilerinde ortaya çıkmaktadır. Peyniraltı suyu, et işleme sırasında oluşan bağ dokuları, kemik ve deri fraksiyonları ile balık işleme atıkları bu grubun başlıca örnekleridir. Bu atıklar; kolajen, jelatin, biyoaktif peptitler, omega-3 yağ asitleri ve mineral bileşenler açısından zengin olup, uygun biyoteknolojik işlemlerle yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir (Toldrá ve ark., 2012; Jacobsen ve ark., 2018). Ancak hayvansal atıkların mikrobiyal yük ve bozulma riski daha yüksek olduğundan, hijyen, soğuk zincir ve proses kontrolü bu sınıfta kritik önem taşımaktadır.

Endüstriyel gıda proses atıkları, büyük ölçekli üretim tesislerinde sürekli ve görece homojen akışlar hâlinde ortaya çıkan yan ürünleri kapsamaktadır. Bira endüstrisinde oluşan arpa posası (*brewer's spent grain*) ve bira mayası, kahve posası ile şeker ve nişasta endüstrilerinden kaynaklanan atık fraksiyonlar bu gruba dâhil edilmektedir. Bu atıklar, genellikle yüksek hacimlerde ve nispeten sabit bileşimde üretilmeleri nedeniyle biyorefineri ve endüstriyel simbiyoz uygulamaları açısından ideal hammadde akışları olarak değerlendirilmektedir (Mussatto ve ark., 2006; Mirabella ve ark., 2014). Özellikle bira üretiminden kaynaklanan arpa posasının (*brewer's spent grain*), yüksek protein ve diyet lifi içeriği, bu yan ürünün gıda formülasyonlarında ve fonksiyonel içerik geliştirme çalışmalarında değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Buna karşılık kahve posası, fenolik bileşikler ve lipid fraksiyonları açısından zengin bir yapıya sahip olup, ekstraksiyon temelli valorization uygulamalarında yaygın biçimde değerlendirilen önemli bir endüstriyel atık kaynağıdır (Mussatto ve ark., 2006; Godos ve ark., 2014).

Bu sınıflandırma, yalnızca gıda atıklarının tanımlanmasına hizmet etmekle kalmamakta; aynı zamanda uygun dönüşüm teknolojilerinin seçilmesi, ürün hedeflerinin belirlenmesi ve proses optimizasyonunun gerçekleştirilmesi açısından da temel bir çerçeve sunmaktadır. Dolayısıyla gıda atıklarının doğru ve sistematik biçimde sınıflandırılması, döngüsel biyoteknoloji temelli sürdürülebilir gıda sistemlerinin geliştirilmesinde kritik bir başlangıç noktası olarak değerlendirilmektedir.

Gıda Atıklarının Biyoteknolojik Dönüşüm Yolları

Gıda atıklarının döngüsel biyoteknoloji kapsamında yeniden değerlendirilmesi, uygulanan biyoteknolojik dönüşüm yoluna bağlı olarak farklı nitelik ve katma değere sahip ürünlerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Fermantasyon, enzimatik hidroliz, mikrobiyal biyotransformasyon ve biyorafineri temelli yaklaşımlar, gıda atıklarının fonksiyonel bileşikler, biyomateriyaller, platform kimyasalları ve biyoenerji ürünlerine dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan biyoteknolojik stratejiler arasında yer almaktadır (Mirabella ve ark., 2014).

Bu dönüşüm süreçlerinin başarısı; atığın kimyasal bileşimi ve biyolojik yapısı, hedeflenen nihai ürünün özellikleri, uygulanan proses koşulları (sıcaklık, pH, süre, enzim veya mikroorganizma türü) ve kullanılan biyoteknolojik aracın verimliliği gibi çok sayıda parametreye bağlıdır (Liguori ve Faraco, 2016). Bu bağlamda biyoteknolojik dönüşüm yollarının seçimi, yalnızca atığın bertaraf edilmesini değil; maksimum değer geri kazanımını, proses verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği esas alan bir yaklaşımı gerektirmektedir.

Fermantasyon temelli dönüşüm

Fermantasyon, düşük maliyetli ve sürdürülebilir olması nedeniyle endüstriyel ölçekte en yaygın kullanılan yöntemdir. Fermantasyon, gıda atıklarının döngüsel biyoteknoloji kapsamında değerlendirilmesinde en yaygın ve en verimli biyoteknolojik dönüşüm yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu süreçte mikroorganizmalar, gıda atıklarında bulunan karbon ve azot kaynaklarını metabolize ederek enerji üretirken; eş zamanlı olarak organik asitler, aroma bileşikler, enzimler ve çeşitli biyoaktif metabolitler sentezlemektedir. Fermantasyonun bu çok yönlü yapısı, gıda atıklarının yalnızca bertaraf edilmesini değil, yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır (Mussatto ve ark., 2006; Mirabella ve ark., 2014).

Bitkisel kaynaklı gıda atıkları, özellikle laktik asit bakterileri tarafından gerçekleştirilen laktik asit fermantasyonu için uygun substratlar oluşturmaktadır. Bu süreçte bitkisel posalar ve şekerce zengin atıklar, laktik asit üretiminin yanı sıra probiyotik veya probiyotik türevli metabolitlerin elde edilmesinde değerlendirilebilmektedir. Benzer şekilde nişasta ve basit şeker içeriği yüksek gıda atıkları, etanol fermantasyonu yoluyla biyoetanol üretiminde kullanılmakta ve biyoyakıt üretimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır (Madhavan ve ark., 2017). Meyve işleme atıkları ise asetik asit fermantasyonu yoluyla sirke üretiminde değerlendirilebilmekte, böylece

geleneksel fermantasyon uygulamaları döngüsel ekonomi yaklaşımıyla yeniden ele alınmaktadır.

Fermantasyon temelli dönüşümün bir diğer önemli uygulama alanı, mantar ve maya fermantasyonu yoluyla katma değerli metabolitlerin üretilmesidir. Özellikle kahve posası gibi aromatik öncüller açısından zengin atıklar, mantar fermantasyonu ile aroma bileşikler ve fonksiyonel bileşenlerin üretiminde kullanılabilmektedir (Murthy ve Naidu, 2012). Düşük enerji gereksinimi, nispeten basit proses kontrolü ve ölçeklenebilirliği sayesinde fermantasyon, gıda endüstrisinde ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir dönüşüm yöntemi olarak endüstriyel ölçekte yaygın biçimde uygulanmaktadır.

Enzimatik hidroliz

Enzimatik hidroliz, bitkisel ve hayvansal kaynaklı gıda atıklarının kontrollü biçimde parçalanmasını sağlayarak yüksek saflıkta ve fonksiyonel özellikleri korunmuş bileşiklerin elde edilmesine olanak tanıyan seçici bir biyoteknolojik dönüşüm yöntemidir. Kimyasal hidroliz yöntemlerine kıyasla daha düşük sıcaklık ve daha ılımlı proses koşullarında gerçekleştirilebilmesi, enzimatik hidrolizi özellikle ısıya duyarlı biyoaktif bileşiklerin korunması açısından avantajlı kılmaktadır (Kristinsson ve Rasco, 2000; Toldrá ve ark., 2012). Bu özellik, enzimatik hidrolizi döngüsel biyoteknoloji kapsamında gıda atıklarının yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesinde öne çıkan bir yaklaşım hâline getirmektedir.

Bitkisel kaynaklı gıda atıkları, enzimatik hidroliz yoluyla hücre duvarı bileşenlerinin parçalanması sayesinde pektin, polifenoller ve diğer fenolik bileşiklerin geri kazanım veriminin artırılmasında yaygın biçimde değerlendirilmektedir. Özellikle pektolitik ve selüloolitik enzimlerin kullanımı, meyve ve sebze işleme atıklarından fonksiyonel bileşenlerin ekstraksiyonunu kolaylaştırmaktadır (Liew ve ark., 2014). Hayvansal kaynaklı atıklar açısından bakıldığında ise balık ve et işleme yan ürünleri, proteolitik enzimlerle hidrolize edilerek antimikrobiyal, antioksidan ve biyolojik olarak aktif peptitlerin üretiminde değerlendirilebilmektedir (Kristinsson ve Rasco, 2000).

Tahıl ve baklagil işleme atıkları, enzimatik hidroliz yoluyla protein hidrolizatlarının elde edilmesi için uygun substratlar sunarken; süt endüstrisinden kaynaklanan peyniraltı suyu ve benzeri yan ürünler, biyoaktif peptitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enzimatik proseslerin yüksek seçiciliği ve kontrol edilebilirliği, hedeflenen bileşenlerin daha yüksek verim ve tekrarlanabilir kalite ile elde edilmesine olanak sağlamakta; bu durum enzimatik hidrolizi endüstriyel ölçekte uygulanabilir ve sürdürülebilir bir

dönüşüm yolu hâline getirmektedir (Toldrá ve ark., 2012; Mirabella ve ark., 2014).

Mikrobiyal biyotransformasyon

Mikrobiyal biyotransformasyon, gıda atıklarında bulunan karmaşık organik bileşiklerin mikroorganizmaların metabolik yolları aracılığıyla yeniden düzenlenmesini sağlayarak özgün ve yüksek katma değerli ürünlerin elde edilmesine olanak tanıyan ileri bir biyoteknolojik dönüşüm yaklaşımıdır. Bu süreçte bakteriler, mayalar, küf mantarları veya mikroalgler; karbon, azot ve lipid içeriği yüksek atıkları metabolize ederek başlangıçta düşük ekonomik değere sahip hammaddeleri fonksiyonel bileşiklere dönüştürebilmektedir (Mussatto ve ark., 2006; Koutinas ve ark., 2014).

Bu kapsamda kahve endüstrisinden kaynaklanan posalar, filamentöz mantarların kontrollü fermantasyonu yoluyla aromatik bileşikler ve uçucu metabolitlerin üretiminde değerlendirilebilirken, benzer şekilde atık yağlar ve lipid açısından zengin yan ürünler, mikroalg fermantasyonu aracılığıyla omega-3 yağ asitleri gibi yüksek değerli lipit fraksiyonlarının üretiminde kullanılabilmektedir. Lignoselülozik yapıya sahip tarımsal ve gıda atıkları ise uygun ön işlemler sonrasında fermentatif süreçlerle eritritol, ksilitol ve pullulan gibi fonksiyonel şeker alkoller ve biyopolimerlerin üretimi için uygun substratlar sunmaktadır (Koutinas ve ark., 2014; Tsegaye ve ark., 2021). Bu yönüyle mikrobiyal biyotransformasyon, endüstride sıklıkla “low value → high value” (düşük değer → yüksek değer) dönüşüm prensibinin en etkili uygulamalarından biri olarak kabul edilmektedir.

Kompostlama ve Anaerobik Çürütme

Kompostlama ve anaerobik çürütme, gıda atıklarının biyoteknolojik dönüşümünde enerji ve besin geri kazanımını hedefleyen temel süreçler olup, özellikle yüksek hacimli organik atık akışlarının yönetiminde stratejik bir rol oynamaktadır. Kompostlama, organik atıkların aerobik koşullar altında mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu stabil ve besin açısından zengin bir organik gübre elde edilmesini sağlarken; anaerobik çürütme, oksijensiz ortamda gerçekleşen mikrobiyal aktiviteler sonucunda metan ve karbondioksitten oluşan biyogazın üretilmesine olanak tanımaktadır (Mirabella ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2014).

Anaerobik çürütme süreci sonucunda elde edilen biyogaz, elektrik ve ısı üretiminde kullanılabilmekte; geriye kalan digestat fraksiyonu ise tarım uygulamalarında toprak iyileştirici ve besin kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu süreçler, özellikle büyük ölçekli gıda

işletmelerinde hem yenilenebilir enerji üretimi hem de atık yönetim maliyetlerinin azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yönüyle kompostlama ve anaerobik çürütme, döngüsel biyoteknolojinin enerji boyutunu temsil eden, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği birlikte hedefleyen dönüşüm yolları olarak öne çıkmaktadır (Zhang ve ark., 2014; Tonini ve ark., 2020).

Gıda Endüstrisinde Sürdürülebilir Proses Tasarımı

Gıda endüstrisinde sürdürülebilir proses tasarımı, atıkların yalnızca ikincil hammadde olarak geri kazanılmasını değil; aynı zamanda su ve enerji kullanımının azaltılması, kaynak verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin sistematik olarak minimize edilmesini hedefleyen bütüncül bir mühendislik yaklaşımını ifade etmektedir. Bu bağlamda atık dönüşümü, proseslerin yeniden yapılandırılması yoluyla operasyonel iyileştirmeleri de kapsamakta ve sürdürülebilir üretimin temel bileşenlerinden biri hâline gelmektedir (Mirabella ve ark., 2014; Korhonen ve ark., 2018).

Sürdürülebilir proses tasarımında öne çıkan uygulamalardan biri, üretim sırasında oluşan yoğunlaşma suları ve proses sularının geri kazanılması yoluyla toplam su tüketiminin azaltılmasıdır. Benzer şekilde ısı geri kazanım sistemleri, kojenerasyon ve enerji entegrasyonu gibi yaklaşımlar, gıda tesislerinde enerji verimliliğini artırarak hem fosil enerji kullanımını hem de sera gazı emisyonlarını düşürmektedir. Atıkların kaynağında ayrıştırılması ise yüksek saflıkta ve homojen atık akışlarının elde edilmesini sağlayarak biyoteknolojik dönüşüm ve biyorefineri uygulamalarının verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Zhang ve ark., 2014).

Çevresel etkileri nicel olarak belirlemek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), sektörde yaygın olarak kabul görmüş bilimsel bir araçtır. LCA, bir ürün veya prosesin beşikten mezara tüm aşamalarında (hammadde temininden nihai bertarafa) ortaya çıkan çevresel yükleri hesaplayarak sürdürülebilirlik temelli karar almayı mümkün kılar (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Dolayısıyla, sürdürülebilir proses tasarımı, gıda endüstrisinde maliyetleri düşürürken çevresel ayak izini de azaltan kritik bir stratejik yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

Gelecek Perspektifleri ve Araştırma Eğilimleri

Gıda atıklarının biyoteknolojik yollarla değerlendirilmesine yönelik araştırmalar, son yıllarda hem teknolojik gelişmeler hem de sürdürülebilirlik odaklı politikalar doğrultusunda hız kazanmıştır. Bu alandaki çalışmalar, başlangıçta atıkların bertaraf edilmesine alternatif çözümler geliştirmeyi

hedeflerken, günümüzde giderek daha fazla değer odaklı, entegre ve sistem temelli yaklaşımlara yönelmektedir. Bu dönüşüm, döngüsel biyoteknolojinin yalnızca atık geri kazanımıyla sınırlı bir uygulama alanı olmaktan çıkarak, gıda üretim sistemlerinin tamamını kapsayan daha geniş bir çerçeveye evrilmesine zemin hazırlamaktadır.

Yapay Zekâ ve Dijital İkizlerle Proses Optimizasyonu

Son yıllarda yapay zekâ (YZ) ve veri temelli modelleme yaklaşımları, gıda atıklarının biyoteknolojik dönüşümünde kullanılan ekstraksiyon, fermantasyon ve biyotransformasyon süreçlerinin optimizasyonunda giderek daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Makine öğrenmesi algoritmaları, çok sayıda proses değişkenini eş zamanlı olarak değerlendirebilme yetenekleri sayesinde optimum ekstraksiyon koşullarının tahmin edilmesinde ve deneysel yükün azaltılmasında etkin biçimde kullanılmaktadır. Benzer şekilde derin öğrenme tabanlı modeller, gıda atıklarının kimyasal bileşiminin ve hammadde karakterizasyonunun hızlı ve yüksek doğrulukla yapılmasına olanak tanımakta; bu durum dönüşüm stratejilerinin daha erken aşamada doğru biçimde belirlenmesini sağlamaktadır (Wolfert ve ark., 2017; Zhou ve ark., 2019).

Bu gelişmelerin bir uzantısı olarak dijital ikiz (digital twin) yaklaşımları, biyoteknolojik proseslerin sanal ortamlarda modellenmesi ve simülasyonu için yeni olanaklar sunmaktadır. Dijital ikizler, gerçek zamanlı proses verileri ile matematiksel modellerin entegrasyonuna dayalı olarak çalışmakta; proses davranışlarının önceden tahmin edilmesine, senaryo analizlerinin yapılmasına ve operasyonel parametrelerin optimize edilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle fermantasyon ve biyorefineri süreçlerinde dijital ikiz uygulamaları, ölçek büyütme risklerinin azaltılması ve proses kararlılığının artırılması açısından dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır (Morone ve ark., 2019).

Bu bağlamda yapay zekâ ve dijital ikiz teknolojileri, gıda endüstrisinde hızlı deney tasarımı, daha düşük geliştirme maliyetleri ve kaynak verimliliğinin artırılması gibi avantajlar sağlayarak döngüsel biyoteknoloji uygulamalarının endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasına katkı sunmaktadır. Ancak bu teknolojilerin etkin biçimde uygulanabilmesi için yüksek kaliteli veri altyapısı, disiplinler arası uzmanlık ve proses bilgisi ile veri biliminin bütünleşik şekilde ele alınması gerekmektedir.

Mikrobiyal Konsorsiyumlarla Çok Aşamalı Dönüşüm

Gelecekte gıda atıklarının biyoteknolojik dönüşümüne yönelik platformların, tek bir mikroorganizmanın kullanıldığı sistemlerden ziyade birden fazla mikroorganizmanın birlikte çalıştığı mikrobiyal konsorsiyumlara dayanması

beklenmektedir. Mikrobiyal konsorsiyumlar, farklı türlerin tamamlayıcı metabolik yeteneklerinden yararlanarak karmaşık substratların daha etkin biçimde parçalanmasını ve dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle heterojen yapıya sahip gıda atıklarının değerlendirilmesinde daha yüksek dönüşüm verimi ve proses kararlılığı sağlaması nedeniyle giderek artan bir ilgi görmektedir (Bernstein and Carlson, 2012; Koutinas ve ark., 2014).

Mikrobiyal konsorsiyumların en önemli avantajlarından biri, çok aşamalı biyotransformasyonların tek bir sistem içinde gerçekleştirilebilmesidir. Farklı mikroorganizma türleri, substratın farklı fraksiyonlarını eş zamanlı veya ardışık olarak metabolize ederek, tek ürün yerine birden fazla nihai ürünün elde edilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin lignoselülozik yapıdaki gıda ve tarımsal atıklar, konsorsiyum temelli fermantasyon süreçleriyle aynı biyoreaktör içerisinde hem biyoetanol hem de organik asitler gibi farklı ürünlere dönüştürülebilmektedir (Zuroff ve Curtis, 2012). Bu tür sistemler, düşük değerli hammaddelerden yüksek katma değerli ürünlerin eş zamanlı üretimini mümkün kılarak döngüsel biyoteknolojinin “low value → high value” yaklaşımını güçlendirmektedir.

Bununla birlikte mikrobiyal konsorsiyumların tasarımı ve kontrolü, tek kültürlü sistemlere kıyasla daha karmaşık olup; türler arası etkileşimlerin, besin rekabetinin ve metabolik dengenin dikkatle yönetilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle gelecekteki araştırmaların, konsorsiyum dinamiklerinin anlaşılması, uygun tür kombinasyonlarının belirlenmesi ve proses kontrol stratejilerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşması beklenmektedir. Bu gelişmeler, mikrobiyal konsorsiyumların endüstriyel biyoteknoloji uygulamalarında daha yaygın ve güvenilir biçimde kullanılmasının önünü açacaktır.

Sürdürülebilir Ambalaj Materyalleri için Gelişmiş Biyopolimer Üretimi

Döngüsel biyoteknoloji bağlamında, sürdürülebilir ambalaj materyalleri için biyopolimer ve biyoplastik üretimi, gıda sektörünün en dinamik araştırma sahalarından biri haline gelmiştir. Petrol bazlı plastiklerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerine dair farkındalığın artması, biyobozunur ve yenilenebilir kaynaklı ambalaj çözümlerine olan talebi hızla yükseltmiştir. Bu bağlamda, selüloz, kitozan, pektin ve nişasta gibi doğal biyopolimerler; atık değerlendirme potansiyelleri ve geliştirilebilir işlevsel nitelikleri sayesinde odağını artırmış durumdadır (Siracusa ve ark., 2008; Rhim ve ark., 2013).

Son yıllardaki çalışmalar, özellikle selüloz nanofiberleriyle güçlendirilmiş biyopolimer kompozitlerin mekanik ve bariyer özelliklerini iyileştirmeye

odaklanmaktadır. Benzer şekilde kitozan ve pektin bazlı filmler, antimikrobiyal ajanlar, antioksidanlar veya doğal ekstraktlarla fonksiyonelleştirilerek biyoaktif ambalajlama sistemleri geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür sistemler, gıdanın raf ömrünü uzatırken sentetik katkı maddelerine olan ihtiyacı da azaltmaktadır (Rhim ve ark., 2013; Azeredo ve ark., 2017). Ayrıca biyopolimer bazlı filamentlerin 3D baskı teknolojileri ile birleştirilmesi, ambalaj tasarımında kişiselleştirilmiş ve malzeme açısından verimli çözümlerin geliştirilmesini mümkün kılan yeni bir araştırma yönü olarak dikkat çekmektedir.

Bu yönleriyle biyopolimer temelli ambalaj teknolojileri, plastik kirliliğine yönelik çözüm arayışlarının merkezinde yer almakta ve gıda endüstrisinde döngüsel biyoteknolojinin somut çıktılarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Zero-Waste Food Factory Konsepti

Zero-waste food factory (sıfır atık gıda fabrikası) konsepti, gıda üretim tesislerinin tüm materyal ve enerji akışlarının kapalı döngü prensiplerine göre yeniden tasarlandığı bütüncül bir üretim modelini ifade etmektedir. Bu yaklaşımda temel hedef, üretim sürecinde ortaya çıkan atıkların sistem dışına çıkarılmadan yeniden üretime kazandırılması veya eş zamanlı olarak enerji ve yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesidir (Mirabella ve ark., 2014; Korhonen ve ark., 2018).

Bu konsept kapsamında, atık ve yan ürün akışlarının gerçek zamanlı sensörler ve veri toplama sistemleriyle izlenmesi, proses sularının ileri arıtma ve geri kazanım sistemleriyle tekrar kullanılması ve üretimin her aşamasının enerji ve malzeme verimliliği açısından optimize edilmesi öngörülmektedir. Aynı zamanda gıda atıkları, biyoteknolojik dönüşüm ünitelerine entegre edilerek fermantasyon, biyotransformasyon veya biyorefineri süreçleri aracılığıyla yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Bu tür entegre sistemler, hem atık yönetimi maliyetlerini azaltmakta hem de tesislerin çevresel performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Zero-waste food factory yaklaşımı, özellikle karbon nötr üretim hedefleri, kaynak verimliliği ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi açısından gıda endüstrisinin geleceğinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu model, döngüsel biyoteknolojinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini somutlaştıran ileri bir sistem yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir.

SONUÇ

Gıda atıklarını döngüsel biyoteknoloji perspektifiyle ele almak, modern gıda sistemlerinin sürdürülebilir bir şekilde dönüşümünde hayati önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, atıkları yalnızca bir atık yükü olarak değil, yeniden kullanıma uygun bir kaynak olarak görerek çevresel, ekonomik ve teknolojik faydaları entegre etmeyi sağlar. Biyorefineri, fermantasyon, biyotransformasyon, yeşil ekstraksiyon ve biyopolimer üretimi gibi teknolojik atılımlar sayesinde gıda atıkları, artık yüksek katma değerli ürünlerin ana hammaddesi olarak etkin biçimde kullanılmaktadır.

Son yıllarda endüstriyel simbiyoz uygulamalarının yaygınlaşması ve bu alanda faaliyet gösteren girişimlerin artması, döngüsel biyoteknolojinin yalnızca teorik bir çerçeve olmadığını, pratikte uygulanabilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır. Buna paralel olarak dijitalleşme, süreç izleme ve optimizasyonuna yönelik yeni araçlar ile mikrobiyal sistemlerin daha kontrollü kullanılmasına olanak tanıyan yaklaşımlar, gıda endüstrisinin daha verimli ve kapalı döngülere dayalı bir yapıya doğru evrildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, gıda atıklarının değerlendirilmesi sürdürülebilirlik hedeflerinin merkezinde yer almakta; gıda mühendisliği, biyoteknoloji ve proses tasarımı alanları arasındaki iş birliği sayesinde hem çevresel etkiler azaltılmakta hem de yeni ekonomik değer alanları oluşturulmaktadır. Döngüsel biyoteknoloji, gıda sektöründe kaynak verimliliğini artıran ve geleceğe yönelik daha dirençli üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayan stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Azeredo, H. M., Rosa, M. F., & Mattoso, L. H. C. (2017). Nanocellulose in bio-based food packaging applications. *Industrial Crops and Products*, 97, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.013>
- Bernstein, H. C., & Carlson, R. P. (2012). Microbial consortia engineering for cellular factories: in vitro to in silico systems. *Computational and structural biotechnology journal*, 3(4), e201210017. <https://doi.org/10.5936/csbj.201210017>
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy conversion and management*, 51(7), 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 313-337. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- Ezeorba, T. P. C., Okeke, E. S., Mayel, M. H., Nwuche, C. O., & Ezike, T. C. (2024). Recent advances in biotechnological valorization of agro-food wastes (AFW): optimizing integrated approaches for sustainable biorefinery and circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101823. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101823>
- FAO. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/mb060e/mb060e.pdf>
- FAO. (2019). *The state of food and agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/11f9288f-dc78-4171-8d02-92235b8d7dc7/content>
- Garcia-Garcia, G., Woolley, E., Rahimifard, S., Colwill, J., White, R., & Needham, L. (2017). A methodology for sustainable management of food waste. *Waste and biomass valorization*, 8(6), 2209-2227. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9720-0>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gkountani, V. A., & Tsoulfas, G. T. (2023). Circular bioeconomy: A review on the current state and future opportunities. In *International Conference on Business Excellence* (pp. 277-286). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19886-1_20

- Godos, J., Pluchinotta, F. R., Marventano, S., Buscemi, S., Li Volti, G., Galvano, F., & Grosso, G. (2014). Coffee components and cardiovascular risk: beneficial and detrimental effects. *International journal of food sciences and nutrition*, 65(8), 925-936. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.940287>
- Holden, N. M., Neill, A. M., Stout, J. C., O'Brien, D., & Morris, M. A. (2023). Biocircularity: a framework to define sustainable, circular bioeconomy. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 77-91. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00180-y>
- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006). *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- Jacobsen, C., Sørensen, A. D. M., Holdt, S. L., Akoh, C. C., & Hermund, D. B. (2019). Source, extraction, characterization, and applications of novel antioxidants from seaweed. *Annual Review of Food Science and Technology*, 10(1), 541-568. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121401>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Koutinas, A. A., Vlysidis, A., Pleissner, D., Kopsahelis, N., Garcia, I. L., Kookos, I. K., ... & Lin, C. S. K. (2014). Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers. *Chemical Society Reviews*, 43(8), 2587-2627. <https://doi.org/10.1039/C3CS60293A>
- Kristinsson, H. G., & Rasco, B. A. (2000). Fish protein hydrolysates: production, biochemical, and functional properties. *Critical reviews in food science and nutrition*, 40(1), 43-81. <https://doi.org/10.1080/10408690091189266>
- Liew, S. Q., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2014). Extraction and characterization of pectin from passion fruit peels. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.033>

- Liguori, R., & Faraco, V. (2016). Biological processes for advancing lignocellulosic waste biorefinery by advocating circular economy. *Bioresource technology*, 215, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.054>
- Lipinski, B., Hanson, C., Waite, R., Searchinger, T., & Lomax, J. (2013). Reducing food loss and waste.
- Madhavan, A., Sindhu, R., Parameswaran, B., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2017). Metagenome analysis: a powerful tool for enzyme bioprospecting. *Applied biochemistry and biotechnology*, 183(2), 636-651. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2568-3>
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- Morone, P., Koutinas, A., Gathergood, N., Arshadi, M., & Matharu, A. (2019). Food waste: Challenges and opportunities for enhancing the emerging bio-economy. *Journal of cleaner production*, 221, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.258>
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of cereal science*, 43(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Pal, P., Singh, A. K., Srivastava, R. K., Rathore, S. S., Sahoo, U. K., Subudhi, S., ... & Prus, P. (2024). Circular bioeconomy in action: Transforming food wastes into renewable food resources. *Foods*, 13(18), 3007. <https://doi.org/10.3390/foods13183007>
- Patinha, C. C., Corrado, S., & Sala, S. (2017). *Food waste accounting-Methodologies, challenges and opportunities*.
- Rifna, E. J., Misra, N. N., & Dwivedi, M. (2023). Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(6), 719–752. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1952923>
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in polymer science*, 38(10-11), 1629-1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>

- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Dalla Rosa, M. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in food science & technology*, 19(12), 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
- Toldrá, F., Aristoy, M. C., Mora, L., & Reig, M. (2012). Innovations in value-addition of edible meat by-products. *Meat science*, 92(3), 290-296. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.004>
- Tonini, D., Hamelin, L., & Astrup, T. F. (2020). Environmental implications of the circular economy: A critical review and analysis of existing life cycle assessment studies. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498>
- Tsegaye, B., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2021). Food waste biorefinery: pathway towards circular bioeconomy. *Foods*, 10(6), 1174. <https://doi.org/10.3390/foods10061174>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zhou, L., Zhang, C., Liu, F., Qiu, Z., & He, Y. (2019). Application of deep learning in food: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 18(6), 1793-1811. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12492>
- Zuroff, T. R., & Curtis, W. R. (2012). Developing symbiotic consortia for lignocellulosic biofuel production. *Applied microbiology and biotechnology*, 93(4), 1423-1435. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3762-9>



ISBN: 978-625-378-519-2